



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NUMERICKÁ SIMULACE ROZŠIŘOVÁNÍ TRUBKY ZA  
DYNAMICKÝCH PODMÍNEK**

NUMERICAL SIMULATION OF A TUBE FLARING UNDER DYNAMIC CONDITIONS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Daniel Hlavačka**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jan Řiháček**

**BRNO 2017**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Daniel Hlavačka**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Numerická simulace rozšiřování trubky za dynamických podmínek**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Jedná se o numerickou simulaci rozšiřování konce trubky pomocí kuželového tvářecího trnu, a to za dynamických podmínek. Předpokládá se modelování řešené problematiky s využitím metody konečných prvků. V rámci řešení bude též provedeno srovnání s experimentálním vyhodnocením.

### **Cíle diplomové práce:**

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na tváření trubek a metodu konečných prvků
- tvorba výpočtového modelu MKP pro zadanou problematiku
- srovnání výsledků MKP s experimentálním vyhodnocením

### **Seznam literatury:**

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

MORRIS, Alan S. Measurement and instrumentation principles. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001, 475 p. ISBN 0750650818.

SAMEK, Radko. Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti. 1. vyd. Brno:VA, 1988. 88 s.

LOGAN, Daryl L. A first course in the finite element method. 4th ed. United States: Thomson, 2007, xvii, 808 s. ISBN 978-0-534-55298-6.

PETRUŽELKA, Jiří a Jiří HRUBÝ. Výpočetní metody ve tváření. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000, 171 s. ISBN 9778-0-521-51823-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

HLAVAČKA Daniel: Numerická simulace rozšiřování trubky za dynamických podmínek.

Práce navazuje na projekt FSI-S-14-2394, v rámci kterého byl zkoumán biaxiální stav napjatosti podélně svařovaných trubek z materiálu 17 240. Experiment probíhal za dynamických podmínek na padostroji, který byl navržen s ohledem na konstrukční jednoduchost a snadnou pozorovatelnost experimentu. Průběh deformace byl zaznamenán pomocí vysokorychlostních kamer a dynamometru. Na výsledky zpracované měřicími přístroji navazuje simulace tohoto experimentu pomocí softwaru využívajícího metodu konečných prvků. Simulace jsou vytvořeny pro vzorky DA8 a DB9. Tyto vzorky byly vybrány z toho důvodu, že nedocházelo k jejich praskání a byly plně dolisovány. Výsledky simulace jsou s malou odchylkou podobné hodnotám naměřených vysokorychlostní kamerou a dynamometrem. Na základě porovnání výsledků lze konstatovat, že simulace je technicky přijatelná.

Klíčová slova: Ocel 17 240, rozšiřování trubek, metoda konečných prvků, simulace

## **ABSTRACT**

HLAVAČKA Daniel: Numerical simulation of a tube flaring under dynamic conditions.

The thesis builds on the project FSI-S-14-2394, in which the biaxial state of tension of longitudinally welded tubes made from material 17 240 was investigated. The experiment was carried out under dynamic conditions on an impact tester, which was designed with structural simplicity and ease of observation of the experiment in mind. Deformation was recorded by high-speed cameras and a dynamometer. Results of the experiment were processed by measuring devices and subsequently used in a simulation created using a software utilizing the finite element method. Simulations were created for samples DA8 and DB9. These samples were selected because they did not crack and were fully stamped. Results of the simulation correspond to the values measured by high-speed cameras and a dynamometer with a small variance. Based on comparison of the results, it can be states that the simulation is technically acceptable.

Keywords: 17 240 steel, tube flaring, finite element methods, simulation

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HLAVAČKA, Daniel. *Numerická simulace rozšiřování trubky za dynamických podmínek*. Brno, 2017. 58 s, 6 Příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření. Vedoucí práce Ing. Jan Řiháček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V ..... dne 26.5.2017

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Řiháčkovi za jeho čas a ochotu a za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu a zázemí, které jsem měl během studií.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ</b> .....	10
1.1 Zkušební vzorek.....	10
1.2 Technologie rozšiřování trubek.....	11
<b>2 ROZŠÍŘOVÁNÍ KONCŮ TRUBEK POMOCÍ TRNU</b> .....	13
2.1 Výchozí rovnice pro popis rozšiřování.....	13
2.2 Vliv rychlosti deformace na chování materiálu.....	19
2.3 Technologické limity .....	21
<b>3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ</b> .....	24
3.1 Diskretizace a základní typy prvků.....	24
3.2 Možnosti řešení simulací.....	26
3.3 Druhy nelinearit .....	29
3.4 Základní popis simulačního programu.....	34
<b>4 PROVEDENÍ EXPERIMENTU</b> .....	36
4.1 Zkušební vzorek DA8.....	40
4.2 Zkušební vzorek DB 9.....	43
4.3 Popis simulace a získané výsledky .....	46
4.4 Srovnání experimentálních a simulačních výsledků .....	53
<b>ZÁVĚRY</b> .....	58

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů



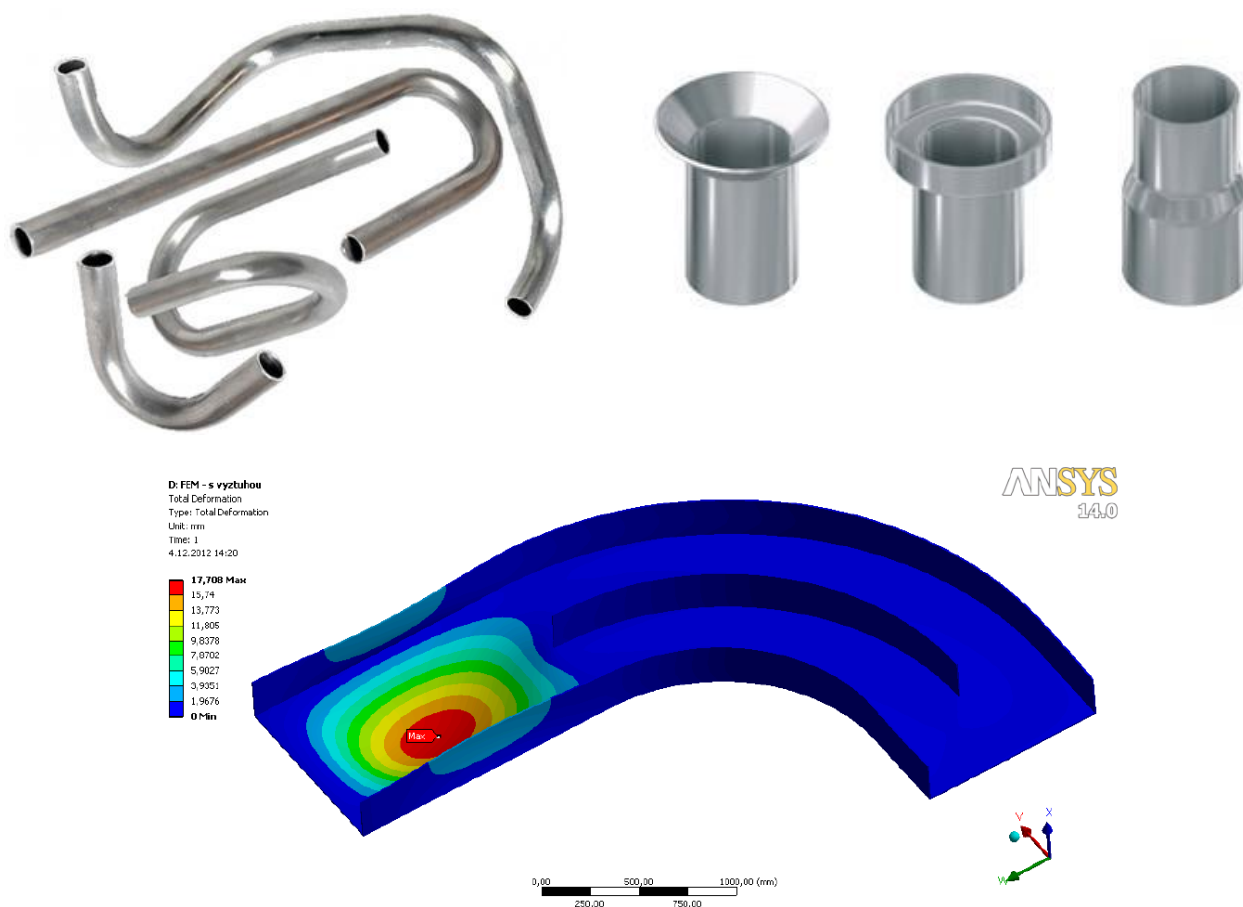
## ÚVOD [9], [30], [32]

Mezi plošné tváření se řadí mnoho technologií. Určitou oblastí je technologie tváření trubek. Jedná se o ohýbání, radiální vypínání, zužování nebo rozšiřování konců. Dílce upravené do požadovaných tvarů jsou dále využívány například k dopravě tekutého nebo sypkého média. Úpravy v jednotlivých místech trubek jsou vytvářeny za účelem lepší montáže, změny tlakových a rychlostních podmínek média, nebo pro úplné zaslepení konce trubky.

Polotovary lze zpracovávat jak za tepla, tak i za studena. Během samotné výroby se lze setkat s kvazistatickými, nebo dynamickými podmínkami. Z toho vyplývá požadavek zkoumat napěťové a deformační charakteristiky při podmínkách, které nejsou dostatečně popsány.

Dosud provedené technologické zkoušky popisují chování materiálu jen za určitých podmínek. Jejich materiálový model je použitelný pouze v některých případech. Proto je nutné provádět další experimenty, které by se zaměřovaly na složitější podmínky.

Velkou výhodou pro praxi přináší numerické metody. Na základě provedených experimentů lze získat data, která mohou být využita v simulačních programech. Ty dále pracují se získanými hodnotami a pomáhají predikovat chování materiálu během zpracovávání. Obecně lze takto dosáhnout snížení nákladů a času při vývoji nových dílů.



Obr. 1 Ukázka dílů z trubek a simulace v programu ANSYS [25], [37], [38]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [9], [26], [30]

V dnešní době se ve většině odvětví klade za cíl minimalizovat váhu produktů při zachování tuhosti a pevnosti konstrukce. Snahou je, aby určité druhy komponentů vyrobených z polotovarů plných průřezů, byly nahrazeny polotovary z trubek nebo dutých profilů. Tváření trubek je běžnou praxí, ale stále existují procesy, u kterých nebyly dostatečně popsány probíhající pochody v materiálu.

Při tvorbě výlisků je předpokládán dvouosý stav napjatosti a trojosý stav přetvoření. Popis celkového deformačního odporu bývá založen na materiálovém modelu, který vychází z odpovídající tahové zkoušky (výskyt jednoosé napjatosti). Při popisu složitějších výlisků však nelze vycházet z tohoto zjednodušení. Stanovení přirozeného přetvárného odporu za podmínek biaxiálního stavu napjatosti bylo předmětem projektu FSI-S-14-2394.

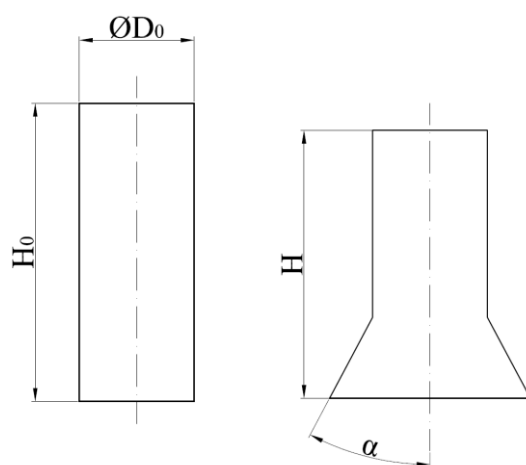
V rámci projektu proběhl experiment, který byl zaměřen na radiální vypínání trubek při kvazistatickém procesu (řešeno v rámci diplomové práce [26]) a dále také při vyšších rychlostech deformací. Experiment se skládal z řady zkoušek, při kterých došlo k rozšíření konce trubky pomocí trnu za předem stanovených podmínek. Z určité výšky byl pouštěn beran o hmotnosti 78 kg, který natlačil vzorek na trn a zastavil se na zarážkách vymezujících určitou výšku stlačení. Průběh byl zaznamenáván vysokorychlostními kamerami, dynamometrem a akcelerometrem.

### 1.1 Zkušební vzorek [4], [10], [17], [26]

Pro zkoušky byly vybrány tenkostěnné podélně svařované trubky. První sada vzorků měla následující parametry: průměr  $D_0 = 28$  mm, výška  $H_0 = 94$  mm a tloušťka stěny  $s_0 = 1$  mm (obr. 2). Druhá sada vzorků se lišila pouze tloušťkou stěny, která měla hodnotu  $s_0 = 1,5$  mm. Zkušební vzorek byl vyroben z materiálu 17 240. Ekvivalenty oceli a chemické složení jsou součástí následujících tabulek:

Tab. 1 Ekvivalenty oceli 17 240. [10]

Norma	Ekvivalenty oceli 17 240
DIN	1.4301
ČSN EN 10088-2	X5CrNi18-10
AISI	304
JIS	SUS304



Obr. 2 Zkušební vzorek

Tab. 2 Chemické složení oceli 17 240. (Chemický rozbor proveden na ÚST – odboru slévárenství)

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	S [%]
0,047	1,646	0,417	18,6	8,08	0,061	0,0012

Mechanické vlastnosti pro daný materiál byly získány v rámci předchozí části projektu z tahových zkoušek trubek, viz literatura [26].

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli 17 240. [26]

Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2}$ [MPa]	385
Mez pevnosti	$R_m$ [MPa]	660
Exponent deformačního zpevnění	$n$ [-]	0,475
Materiálová konstanta	$K$ [MPa]	1675

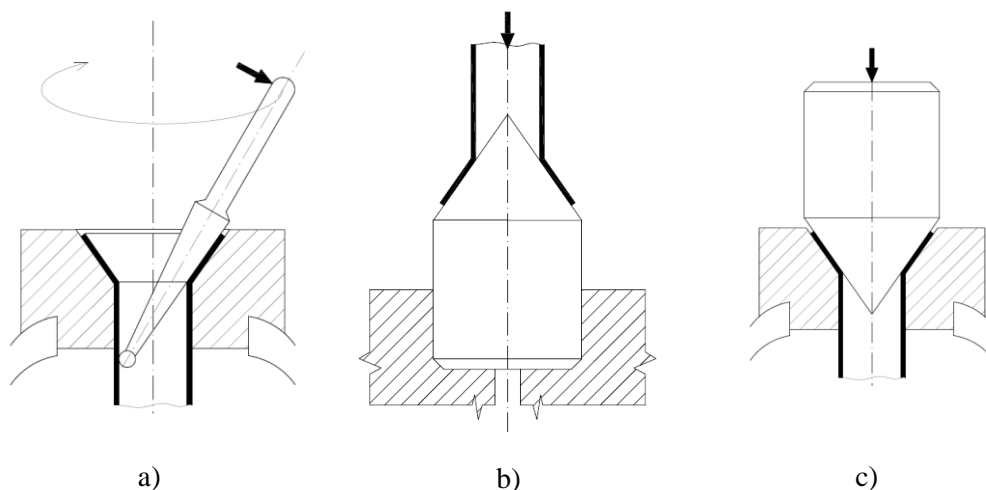
Jedná se o austenitickou chromniklovou korozivzdornou ocel, která je charakteristická dobrou tažností. Materiál je nemagnetický a dobře odolává oxidačnímu prostředí. Díky malému obsahu uhlíku nedochází během svařování k precipitaci karbidů ve velkém množství, riziko mezikrystalové koroze je snižené. Tato ocel je vhodná pro výrobu pivních sudů, výparníků, kuchyňského náčiní, tlakových nádob, trubek a dalších výrobků.

## 1.2 Technologie rozšiřování trubek [26], [27], [29], [32]

Trubky s rozšířeným koncem lze využít jako součásti rozebíratelných systémů. Používají se především v hydraulice nebo v palivových soustavách. K rozšíření lze využít trnů různých konstrukcí, nebo plyného, kapalného, popř. pryžového média.

Procesy lze rozdělit na kvazistatické, nebo dynamické. Hlavním kritériem je rychlost nástroje a rychlost deformace. Na základě zmíněných veličin je možno zařadit jednotlivé technologie rozšiřování do určité skupiny tvářecích procesů. V následujících odstavcích jsou stručně popsány vybrané kvazistatické technologie:

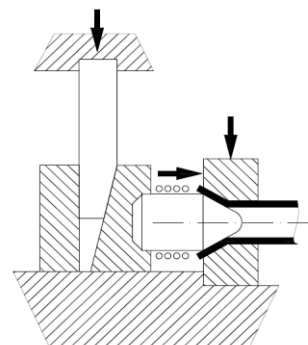
- Rozšíření konce tenkostěnných trubek menšího průměru lze vytvořit ručním rozválcováním pomocí krouživého pohybu páky s kuželovým zakončením (obr. 3a).



- a) ruční rozválcování,
- b) rozšiřování pomocí nepohyblivého trnu,
- c) rozšiřování pomocí pohyblivého trnu.

Obr. 3 Metody rozšiřování konců trubek [27], [29]

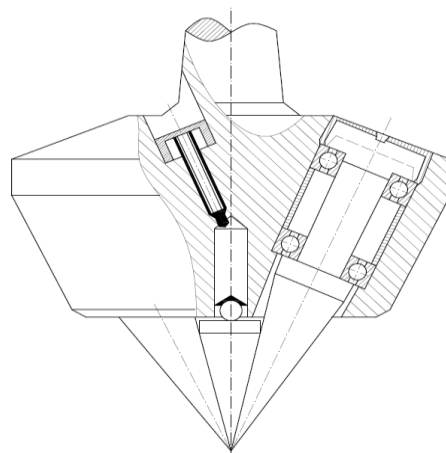
- Požadovaného rozšíření lze docílit i pouhým tlakem, který působí na trubku, nebo trn (obr. 3b, 3c). Pro rozšiřování trubek s větším průměrem a větší tloušťkou může sloužit nerotující kuželový trn, na který působí klín ovládaný beranem lisu pomocí kulisy (obr. 4).



Obr. 4 Přípravek pro rozšiřování konců trubek [29]

- Rozválcování konců (obr. 5) je metoda rozšiřování konce trubky pomocí kuželového nástroje. Při této operaci vykonává rotační pohyb nejen nástroj, ale i jednotlivé kužely. Pro trubky menšího průřezu lze využít vrtačky k výrobě rozšíření, kdy se do vřetene stroje upne tvářecí kužel.

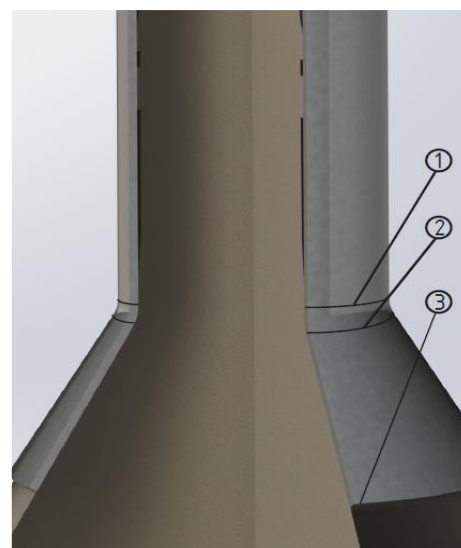
Jak již bylo zmíněno, rozšiřování za kvazistatických podmínek bylo náplní diplomové práce [24]. Pro experiment sledující dynamické podmínky byla zvolena aparatura s nepohyblivým trnem.



Obr. 5 Rozválcovací trn [32]

## 2 ROZŠÍŘOVÁNÍ KONCŮ TRUBEK POMOCÍ TRNU [9], [26], [30]

Cílem experimentu bylo zkoumat chování vzorku při biaxiálním stavu napjatosti. Pro rozšíření trubky byl použit statický kuželový trn, na který se pomocí beranu nasouval zkoumaný vzorek. Důvody této volby jsou snadné zajištění dynamických podmínek a bezproblémové snímání povrchu trubky během samotného tváření pomocí optických měřidel. Důležitými faktory u tohoto procesu jsou materiál trubky, teplota tváření, geometrie trnu, výška, ze které bylo závaží puštěno a tření mezi trubkou a trnem. Při procesu rozšiřování lze pozorovat dvě fáze, a to ohyb (obr. 6, oblast mezi body 1 a 2) a formování dle tvaru trnu (oblast mezi body 2 a 3). Vzhledem k malým hodnotám tloušťky stěny lze předpokládat, že napětí v tomto směru výrazně neovlivňuje ostatní složky napětí a proto se považuje za zanedbatelné. Z toho důvodu se dále uvažuje biaxiální stav napjatosti. Konkrétně zde vystupuje obvodové napětí  $\sigma_\theta$  a radiální napětí  $\sigma_r$ .



Obr. 6 Detail fází procesu rozšiřování [9]

### 2.1 Výchozí rovnice pro popis rozšiřování [9], [29], [33]

Aby bylo možné vypočítat zatěžující sílu je potřeba znát hodnotu celkového deformačního odporu v bodě 1. Jeho hodnota je dána součtem jednotlivých složek napětí:

$$(\sigma_d)_T = \sigma_r + \sigma_f + \sigma_o \quad (2.1)$$

kde:  $\sigma_r$  – radiální napětí [MPa],  
 $\sigma_f$  – napětí způsobené třením [MPa],  
 $\sigma_o$  – ohybové napětí [MPa].

Hodnota radiálního napětí je rozhodující pro řešení deformačního odporu, který je způsoben silou  $F$ . Pro stanovení působících napětí při rozšiřování (zmenšování) průřezu osově symetrických součástí jsou využívány rovnice silové rovnováhy, které jsou vztaženy k určitému biaxiálně zatíženému elementu (obr. 7 a 8).

Výchozí rovnice působící v normálovém směru k elementu má následující tvar:

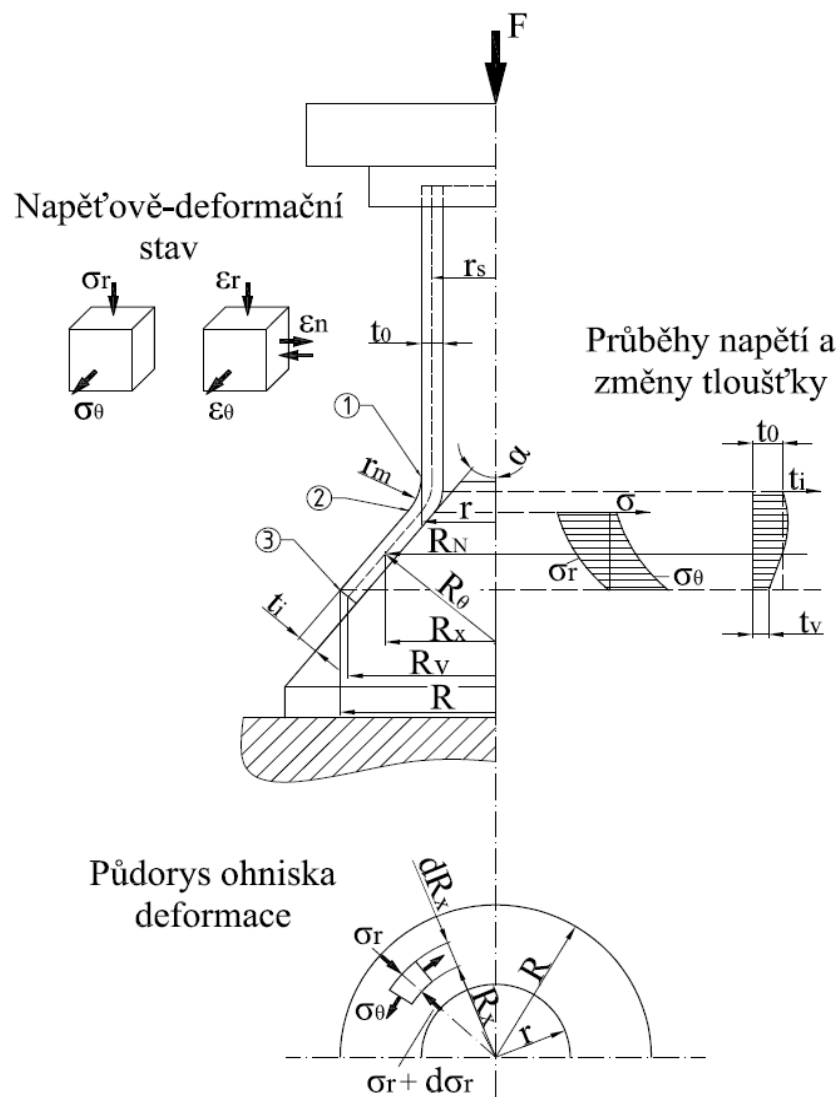
$$\sigma_n \cdot S_3 - 2\sigma_r \cdot S_1 \cdot \frac{d\alpha}{2} - 2\sigma_\theta \cdot S_2 \cdot \frac{d\vartheta}{2} = 0 \quad (2.2)$$

kde:  $\sigma_\theta$  – obvodové napětí [MPa],  
 $\sigma_n$  – normálové napětí [MPa],  
 $d\alpha, d\vartheta$  – úhly elementu [°],  
 $S_1, S_2, S_3$  – plochy elementu [mm<sup>2</sup>].

Řešení výchozí rovnice silové rovnováhy elementu vede k tzv. rovnici dle Laplace, která je vyjádřena vztahem (2.3). Rovnice zohledňuje vliv tření na stykové ploše nástroje a dílce.

$$\frac{\sigma_n}{s_0} - \frac{\sigma_r}{R_r} - \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} = 0 \quad (2.3)$$

kde:  $R_r, R_\theta$  – poloměry [mm],  
 $s_0$  – počáteční tloušťka stěny [mm].

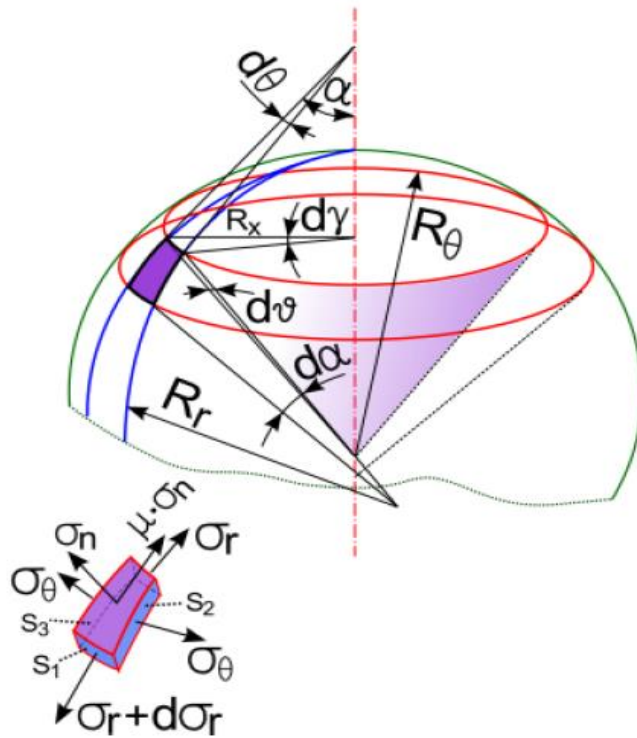


Obr. 7 Napětově-deformační stav  
 při rozšiřování trubek [9]

V radiálním směru, kdy je v úvahu bráno tření mezi kontaktními plochami, je rovnice silové rovnováhy vyjádřena následovně:

$$(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot S_1 - \sigma_r \cdot S_1 - 2\sigma_\theta \cdot S_2 \cdot \frac{d\theta}{2} - \mu \cdot \sigma_n \cdot S_3 = 0 \quad (2.4)$$

kde:  $\mu$  – koeficient tření [-],  
 $d\theta$  – úhel elementu [°].



Obr. 8 Geometrie obecného elementu [9]

Úpravou rovnice (2.4) vznikne následující tvar:

$$R_x \frac{d\sigma_r}{dR_x} + \sigma_r - \sigma_\theta - \frac{\mu \cdot R_x}{\sin \alpha} \cdot \left( \frac{\sigma_r}{R_r} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0 \quad (2.5)$$

kde:  $R_x$  – obecný poloměr [mm].

V případě kuželového zakončení se situace značně zjednoduší, protože povrch rozšíření má rovný tvar. Z toho vyplývá, že hodnota poloměru  $R_r$  je rovna  $\infty$ . Na základě tohoto poznatku lze rovnice (2.3) a (2.5) přepsat jako:

$$\frac{\sigma_\theta}{R_\theta} = \frac{\sigma_n}{s_0} \quad (2.6)$$

$$R_x \frac{d\sigma_r}{dR_x} + \sigma_r - \sigma_\theta - \frac{\mu \cdot R_x \sigma_n}{s_0 \sin \alpha} = 0 \quad (2.7)$$

Z uvedených rovnic lze obyčejnou úpravou a využitím zákona plasticity (2.8) získat rovnice hlavních napětí, které jsou vyjádřeny vztahem (2.10) a (2.11):

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_k \quad (2.8)$$

kde:  $\sigma_k$  – mez kluzu [MPa].

$$\sigma_{\theta} = \sigma_k \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{R_x}{R_v} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] \right\} \quad (2.9)$$

kde:  $R_v$  – střední poloměr v nejširším místě rozšíření [mm].

$$\sigma_r = -\sigma_k \left( 1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{R_x}{R_v} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] \quad (2.10)$$

Radiální napětí je důležité pro výpočet celkového deformačního odporu. Na základě rovnice (2.10) je patrné, že toto napětí má tlakový charakter (záporná hodnota), kde se maximum nachází na poloměru  $R_x = r$ .

Do výpočtu je nutné zahrnout zpevňování materiálu. Docílí se toho nahrazením hodnoty meze kluzu  $\sigma_k$  v rovnici (2.10) střední hodnotou (konkrétně pro oblast mezi bodem 2 a 3). Pro určení je možné využít exponenciální nebo lineární aproximaci. Dále je uveden postup využití lineární aproximace.

$$\bar{\sigma} = \sigma_{ke} + \bar{D} \cdot \varepsilon_{\theta} \quad (2.11)$$

kde:  $\bar{\sigma}$  – střední hodnota napětí [MPa],

$\sigma_{ke}$  – Aproximovaná mez kluzu [MPa],

$\varepsilon_{\theta}$  – přetvoření v obvodovém směru [-].

Kde  $\bar{D}$  je modul deformačního zpevnění, který je možné vyjádřit následovně:

$$\bar{D} = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n \quad (2.12)$$

kde:  $K$  – koeficient napětí [MPa],

$n$  – exponent deformačního zpevnění [-].

Hodnota aproximované meze kluzu se získá na základě následujícího vztahu:

$$\sigma_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n \quad (2.13)$$

Na počátku kuželové části (bod 2), kde  $R_x = r$ , je obvodová deformace rovna nule. Při vložení nulové hodnoty deformace do rovnice (2.11) vznikne první aproximační rovnice:

$$(\bar{\sigma})' = \sigma_{ke} \quad (2.14)$$

Druhá aproximační rovnice se vztahuje k bodu 3. Hodnota obvodové deformace je v tomto místě maximální. Obecný poloměr  $R_x$  dosáhne hodnoty  $R_v$ . Hodnota maximální deformace je vyjádřena dle vztahu (2.15). Poté se dosadí do rovnice (2.11) a vznikne vztah (2.16).

$$(\varepsilon_{\theta})_{max} = \frac{R_v - r}{r} \quad (2.15)$$

kde:  $r$  – vnější poloměr trubky [mm].



$$(\bar{\sigma})'' = \sigma_{ke} + \bar{D} \left( \frac{R_v - r}{r} \right) \quad (2.16)$$

Střední hodnotu meze kluzu lze vyjádřit jednoduchou rovnicí (2.17):

$$(\bar{\sigma})_{mid} = \frac{(\bar{\sigma})' + (\bar{\sigma})''}{2} \quad (2.17)$$

Po aproximaci vznikne rovnice střední hodnoty meze kluzu, kterou je možno, po dosazení výše odvozených hodnot aproximačních napětí, vyjádřit vztahem (2.18). Po přepsání vznikne finální tvar pro hodnotu maximálního radiálního napětí v podobě vztahu (2.19).

$$(\bar{\sigma})_{mid} = \sigma_{ke} + \frac{\bar{D}}{2} \cdot \left( \frac{R_v - r}{r} \right) \quad (2.18)$$

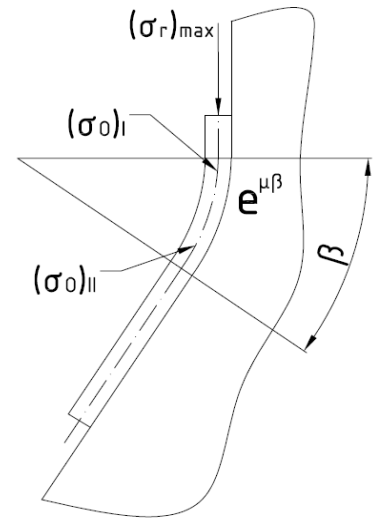
$$(\sigma_r)_{max} = \left[ \sigma_{ke} + \frac{\bar{D}}{2} \cdot \left( \frac{R_v - r}{r} \right) \right] \left( 1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_v} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] \quad (2.19)$$

Další složkou výpočtu celkového deformačního odporu  $(\sigma_d)_T$  je ohybové napětí. Skládá se ze dvou částí. První část  $(\sigma_o)_I$  se vztahuje k ohybu a druhá souvisí s napřímováním v průběhu působení napětí  $(\sigma_o)_{II}$  (obr. 9):

$$(\sigma_o)_I + (\sigma_o)_{II} = \frac{\sigma_k \cdot s_0}{2 \cdot r_m + s_0} \quad (2.20)$$

kde:  $r_m$  – poloměr ohybu trubky [mm].

Zbývajícím vlivem, který je třeba zahrnout do výpočtu celkového deformačního odporu je tření. Vyskytuje se v oblasti mezi body 1 a 2 (tření pásové) a 2 a 3 (obr. 7). Tření v kuželové části bylo zahrnuto během výpočtu maximálního radiálního napětí. Vliv pásového tření se projeví implementováním faktoru  $e^{\mu\beta}$  do rovnice výpočtu celkového deformačního odporu:



Obr. 9 Rozložení ohybového napětí [9]

$$(\sigma_d)_T = [(\sigma_r)_{max} + (\sigma_o)_I + (\sigma_o)_{II}] \cdot e^{\mu\beta} \quad (2.21)$$

kde:  $e$  – Eulerovo číslo [-],  
 $\beta$  – úhel opásání [rad].

Po dosazení odvozených napětí lze rovnici (2.21) přepsat do následujícího finálního tvaru:

$$(\sigma_d)_T = \left\{ \left[ \sigma_{ke} + \frac{\bar{D}}{2} \cdot \left( \frac{R_v - r}{r} \right) \right] \cdot \left[ \left( 1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{r}{R_v} \right)^{\mu \cot \alpha} \right) \right] + \left( \frac{\sigma_k s_0}{2 r_m + s_0} \right) \right\} \cdot e^{\mu\beta} \quad (2.22)$$

Nezbytná síla vychází z celkového deformačního odporu  $(\sigma_d)_T$ , který je počítán k bodu počátku tváření trubky (konkrétně bod 1 na obrázku 7). Obecně je síla vyjádřena jako součin napětí a plochy, na kterém toto napětí působí:

$$F = (\sigma_d)_T \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot s_0 \quad (2.23)$$

kde:  $r_s$  – střední poloměr trubky [mm].

V rámci výpočtů je vhodné zjistit také konečnou tloušťku stěny. Především z toho důvodu, aby nedošlo k přílišnému ztenčení. Vychází se z rovnic teorie plasticity a jejich úpravou lze na základě předpokladů působení biaxiálního napětí obdržet vztah:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_r - d\varepsilon_n}{d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_n} \quad (2.24)$$

kde:  $d\varepsilon_r$  – přírůstek deformace v radiálním směru [-],  
 $d\varepsilon_n$  – přírůstek deformace ve směru tloušťky [-],  
 $d\varepsilon_\theta$  – přírůstek deformace v obvodovém směru [-].

Pro zjednodušení se využije rovnice zákona zachování objemu:

$$d\varepsilon_r = -d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_n \quad (2.25)$$

Po dosazení do vztahu (2.24) vznikne obecný vztah:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = -\frac{d\varepsilon_\theta + 2d\varepsilon_n}{d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_n} \quad (2.26)$$

Za účelem získání poměru přírůstků deformace  $\varepsilon_n/\varepsilon_\theta$  je možné rovnici (2.26) upravit do následujícího tvaru:

$$d\varepsilon_n = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta} (d\varepsilon_\theta) \quad (2.27)$$

Během procesu platí předpoklad určité proporcionality, proto je možné přírůstky deformací nahradit skutečným přetvořením ( $d\varepsilon_n \approx \varphi_n$  a  $d\varepsilon_\theta \approx \varphi_\theta$ ). Ve směru tloušťky stěny je logaritmická deformace vyjádřena dle vztahu (2.28). Skutečnou deformaci v obvodovém směru popisuje rovnice (2.29). Po dosazení do vztahu (2.27) vznikne rovnice (2.30).

$$d\varepsilon_n = \ln \frac{s_0}{s_x} \quad (2.28)$$

kde:  $s_x$  – tloušťka trubky v obecném bodě [mm].

$$d\varepsilon_\theta = \ln \frac{R_x}{r} \quad (2.29)$$

$$\ln \frac{s_0}{s_x} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta} \cdot \ln \frac{R_x}{r} \quad (2.30)$$

Tloušťku stěny na obecném poloměru lze vyjádřit dle vztahu (2.31).

$$s_x = s_0 \left( \frac{r}{R_x} \right)^{\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta}} \quad (2.31)$$

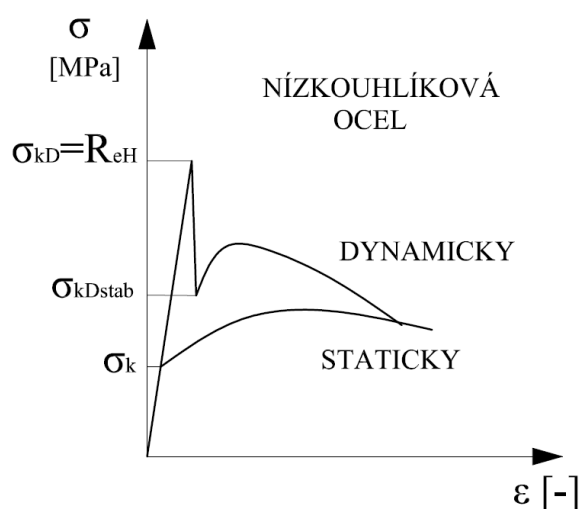
K výpočtu minimální tloušťky stěny, která je vyjádřena vztahem (2.33), lze využít tzv. technologický koeficient rozšiřování  $k_r$ , který je vyjádřen vztahem (2.32). Lze jej využít k hodnocení deformačních možností daného materiálu a geometrických parametrů.

$$k_r = \sqrt{\frac{r}{R_v}} \quad (2.32)$$

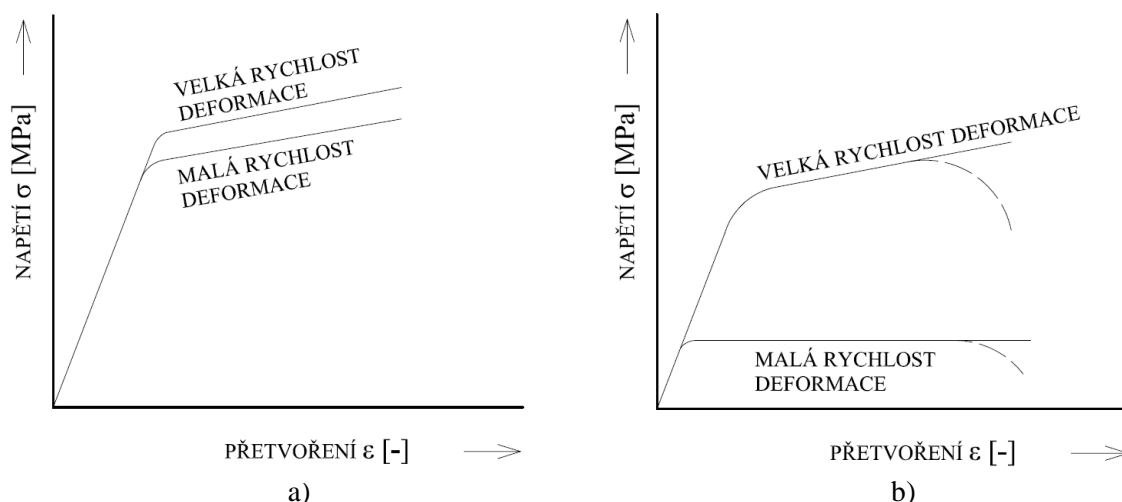
$$s_v = s_0 \cdot k_r \quad (2.33)$$

## 2.2 Vliv rychlosti deformace na chování materiálu [7], [18], [31], [34], [35]

Hodnota celkového deformačního odporu, a z toho vyplývající síla, je ovlivnitelná rychlostí deformace. Obecně lze předpokládat, že s rostoucí rychlostí deformace vzrůstá mez kluzu a klesá plasticita tvářeného materiálu. Při vyšších rychlostech deformace dochází k zvýšení meze kluzu (obr. 10). Po dosažení meze kluzu dochází k tzv. zborcení materiálu, kdy dojde k poklesu napětí. Poté se křivka napětí/deformace ustálí a její průběh pokračuje stabilněji. V některých případech může dojít i ke změně mechanismu vzniku deformace. Vliv rychlosti deformace na hodnotu deformačního odporu při tváření za studena (obr. 11a) je menší než při tváření za tepla (obr. 11b).



Obr. 10 Obecný průběh křivek napětí/deformace [34]

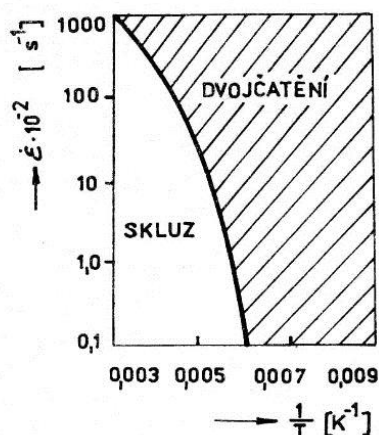


Obr. 11 Průběh napětí v závislosti na rychlosti deformace [18]

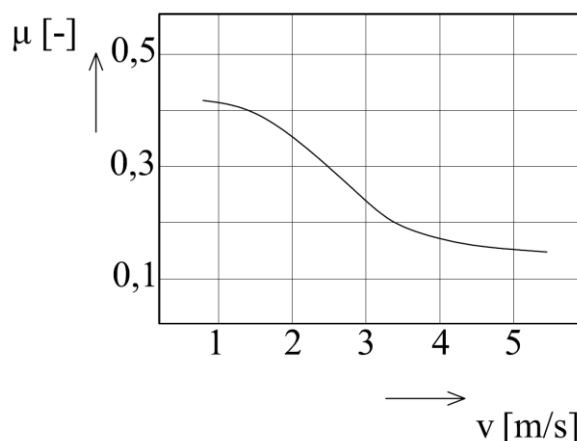
Na základě rychlosti deformace a teploty je ovlivněn také mechanismus plastické deformace. Za větších rychlostí deformace a nižších teplot lze očekávat deformaci skluzem. Zvyšující se rychlost a snižující se teplota podporuje vznik dvojčatění (obr. 12).

V určitých případech tváření za studena při velmi vysokých rychlostech deformace může nastat jev zotavení, který je důsledkem tepelného efektu (energie spotřebovaná na plastické přetvoření se změní v teplo). Dochází tak ke snížení meze kluzu a zvýšení plasticity.

Při vyšších rychlostech nástroje je také vhodné vzít v úvahu změnu třecích podmínek. Obecně lze předpokládat, že se vzrůstající rychlostí klesá koeficient tření (obr. 13).



Obr. 12 Mechanismy plastické deformace [7]



Obr. 13 Obecná závislost koeficientu tření na rychlosti nástroje [34]

V případech, kdy rychlost překročí určitou mez, stane se nezanedbatelným faktorem tváření. Rovnice určené pro kvazistatické podmínky nelze využívat a je nutné zvolit některý z modelů popisujících dynamický stav. Jedním z vhodných popisů materiálu za dynamických podmínek je vztah dle Johnson-Cooka (2.34).

$$\sigma = (\sigma_0 + B \cdot \epsilon^n) \left( 1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\phi}}{\dot{\phi}_0} \right) [1 - (T^*)^m] \quad (2.34)$$

kde:  $\sigma_0$  – mez kluzu [MPa],

$B$  – modul zpevnění [MPa],

$C$  – koeficient citlivosti na rychlost deformace [-],

$\dot{\phi}$  – rychlost deformace [ $s^{-1}$ ],

$\dot{\phi}_0$  – referenční rychlost deformace [ $s^{-1}$ ],

$m$  – teplotní koeficient odpevnění [-],

$T^*$  - homologická teplota [K] stanovená podle následujícího vztahu (2.35):

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad (2.35)$$

kde:  $T$  – pracovní teplota [K],

$T_0$  – referenční teplota (teplota okolí) [K],

$T_m$  – teplota tavení [K].

Konstitutivní vztah v sobě zahrnuje vliv přirozeného přetvárného odporu na deformaci (v první části), na rychlosti deformace (ve střední části) a na teplotě (v poslední části rovnice). Parametry  $\sigma_0$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  a  $m$  je potřeba stanovit experimentálně. K určení lze využít Taylorův test

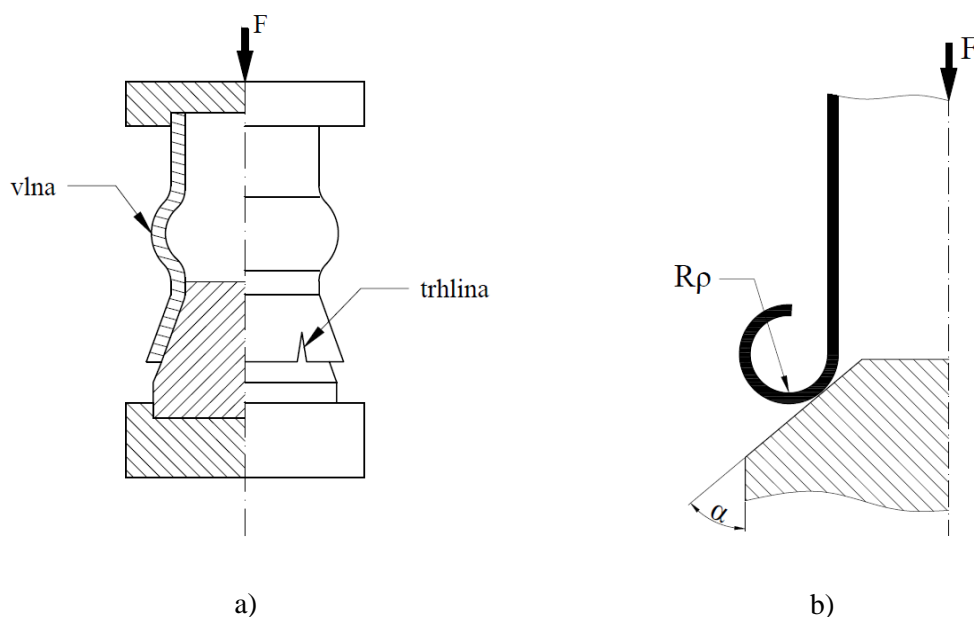
(Taylor anvil test – TAT). TAT lze vyhodnotit na základě geometrie deformovaného vzorku, kdy lze pomocí empirických vztahů získat dynamickou mez kluzu. Pro komplexní vyhodnocení je potřeba využít počítačové simulace experimentu a stanovit parametry konstitutivních rovnic.

## 2.3 Technologické limity [18], [28], [29], [32],

Metoda rozšiřování konce trubek je omezena vznikem defektů. Vady se mohou vyskytnout ve formě trhliny na hraně trubky, zvlnění (obr. 14 a), které je důsledkem ztráty vzpěrné stability stěny, nebo zpětného zakroužení hrany (obr. 14 b).

Iniciace trhliny na hraně trubky je ovlivněna následujícími faktory:

- hodnotou koeficientu rozšíření  $k_r$  (je závislá na limitní geometrii rozšíření),
- existencí jednoosé tahové napjatosti,
- zhoršenou jakostí povrchu hrany,
- velkým ztenčením tloušťky stěny,
- nízkou intenzitou zpevňování materiálu,
- normálovou anizotropií.



Obr. 14 Defekty rozšiřovaných konců trubek [29]

Vznik defektů je možno predikovat na základě diagramů vytvořených pro dané podmínky. Například konkrétně koeficient rozšíření  $k_r$  je možno určit z diagramu uvedeného na obrázku 15.

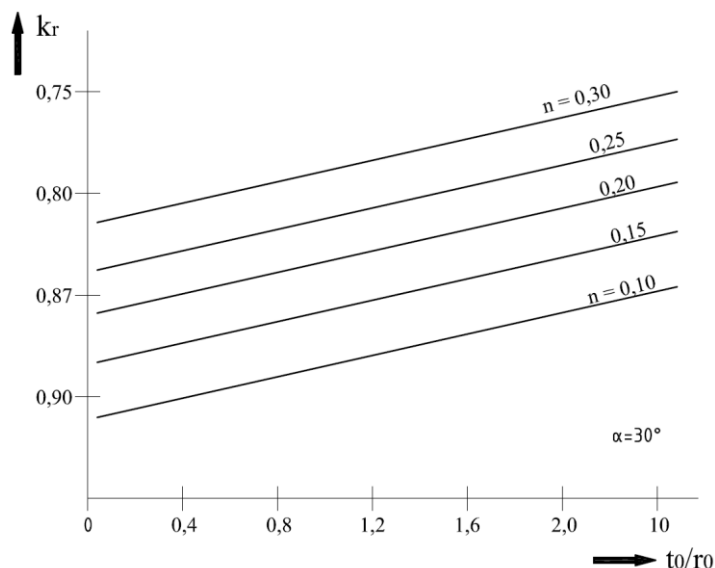
K určení je nutné ale znát faktory ovlivňující proces rozšiřování (poměrná tloušťka, úhel kužele lisovnice a exponent deformačního zpevňování materiálu).

Mezní hodnotu koeficientu rozšíření je možné určit také na základě vztahu (2.36):

$$k_r = \frac{1}{(1 + \varepsilon_m)} \quad (2.36)$$

kde:  $\varepsilon_m$  – poměrné prodloužení na mezi pevnosti materiálu [-].

Tuto hodnotu lze dále implementovat do výpočtu konečné tloušťky stěny, vyjádřené vztahem (2.33). Hodnotu koeficientu rozšíření lze pozitivně ovlivňovat lokálním ohřevem ohniska deformace.



Obr. 15 Kritické hodnoty  $k_r$  [29]

Nezanedbatelným faktorem při rozšiřování trubek je anizotropie. Jedná se o rozdíl mechanických vlastností materiálu v závislosti na směru měření těchto veličin. Tyto rozdíly vznikají v důsledku tváření a tepelného zpracování, při kterých se v polotovarech tvoří tzv. textura. Lze rozeznat dva druhy anizotropie, a to anizotropie strukturální a krystalografická, kdy:

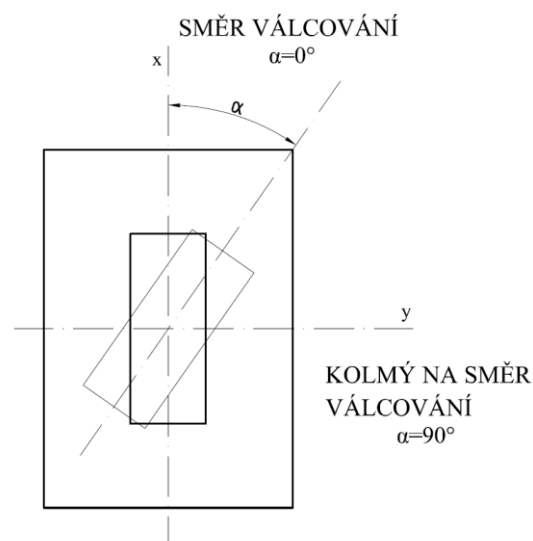
- strukturální anizotropie je dána protažením, rozmístěním a orientací vměstků ve směru válcování, nelze odstranit tepelným zpracováním,
- krystalografická anizotropie je dána prodloužením a usměrněním zrn ve směru válcování, lze ji ovlivnit tepelným zpracováním a technologickým postupem.

K posuzování míry anizotropie a tvažitelnosti materiálů je používán součinitel plastické (normálové) anizotropie  $r_\alpha$ , vyjádřena vztahem (2.37) a součinitel plošné anizotropie  $\Delta r$ , vyjádřené vztahem (2.39). Index  $\alpha$  u normálové anizotropie označuje úhel směrové orientace odebíraného vzorku (obr. 16).

Součinitel plastické (normálové) anizotropie popisuje nerovnoměrnost pevnostních charakteristik a plasticity v rovině plechu v porovnání s charakteristikami ve směru tloušťky. Aby se docílilo popisu souhrnného vlivu orientace vzorků, byla zavedena hodnota  $r_s$ , tedy vážený průměr součinitelů anizotropie popsán vztahem (2.38).

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_t} \quad (2.37)$$

kde:  $\varphi_b$  – přetvoření ve směru [-],  
 $\varphi_t$  – přetvoření v tloušťce [-].



Obr. 16 Odběr vzorků pro zjištění anizotropie [18]

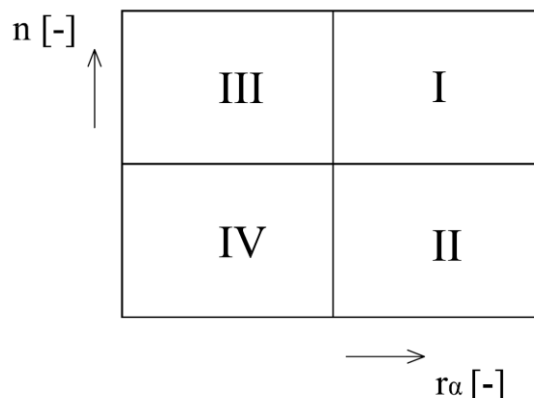
$$r_s = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.38)$$

Plošná anizotropie se využívá k hodnocení cípatosti výtažků z plechu.

$$\Delta r = \frac{1}{2} \cdot (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) \quad (2.39)$$

Na základě normálové anizotropie a koeficientu deformačního zpevnění materiálu lze sestavit Liletův diagram (obr. 17), který vymezuje oblasti pro tažení či vypínání materiálu (kde oblast I je nejvhodnější pro hluboké tažení, kdežto oblast IV je nejméně vhodná).

Pro rozšiřování konců trubek je z hlediska normálové anizotropie vhodné, aby hodnota koeficientu byla u polotovaru větší v podélném směru než ve směru obvodovém. Hodnoty obou uvedených by měly být větší jak jedna.



Obr. 17 Liletův diagram [32]

Vliv na kuželovitost zakončení má také úhel lisovnice  $\alpha$ . Ovlivňuje intenzitu změn napětí a deformaci v radiálním směru. Vyšší úhel sice zvětšuje deformační možnosti, ale také dochází k nárůstu deformačního odporu. Hodnoty úhlu vyšší než  $55^\circ$  mohou vést až k tvorbě zpětného zakroužení (obr. 14b). Tomu lze předcházet využitím příločky.

Ve válcové části výrobku se může vyskytnout ztráta vzpěrné stability ve formě příčné vlny (vznik vady z pravidla v bodě 1 na obr. 7). Deformační odpor zde dosahuje své maximální hodnoty, na které se značně podílí radiální napětí. V tomto úseku by neměla hodnota radiálního napětí překročit mez kluzu.

Je vhodné také zmínit vliv tření, který ovlivňuje hodnotu síly  $F$ . Při nerovnoměrném mazání dochází ke změně podmínek toku materiálu v radiálním směru, což může mít za následek nepravidelnost linie hrany.

### 3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ [24], [35], [40]

Vyhodnocení experimentu lze řešit analyticky. Může ale nastat situace, kdy analytické řešení bude mít určitou odchylku od naměřených hodnot. Analytické řešení je vhodné pro součásti jednoduchých geometrických tvarů a zatížení. U složitějších tvarů a operací může dojít ke zkreslení výsledků na základě zjednodušení, která se provedou při sestavování rovnic řešení daného problému. Reálné procesy tváření bývají podstatně složitější, ale lze je řešit numericky. Výsledky tohoto způsobu výpočtu bývají zatíženy chybou, se kterou lze, při správně provedené simulaci, považovat výsledek za technicky přijatelný (odchylka řádově v jednotkách několika málo procent od skutečných hodnot). Mezi numerické metody se řadí například metoda konečných objemů, metoda hraničních prvků, nebo tzv. bezsíťové metody (Mesh Free Method). Nejčastěji využívanou metodou je metoda konečných prvků (MKP).

Jedná se o numerickou metodu řešení diferenciálních rovnic. Hledané neznámé jsou aproximovány po částech spojitými funkcemi. Obvykle jsou koeficienty funkcí určitého elementu zvoleny tak, aby jejich hodnota odpovídala konkrétnímu bodu v elementu (uzlovému bodu). Během procesu řešení jsou diferenciální rovnice zjednodušeny a celá úloha je řešena po částech, kdy je počítáno s dílčími výsledky od jednotlivých prvků. Proces řešení pomocí MKP lze rozdělit do následujících etap:

- pre-processing,
- processing,
- post-processing.

Etape pre-processingu zahrnuje především rozdělení geometrických modelů zkoumaných objektů na konečný počet malých elementů (diskretizace). Důležitou roli hraje rozložení řešeného problému (1D, 2D, 3D). Dochází zde také k nastavení počátečních podmínek, materiálových modelů a parametrů pracovního procesu.

V rámci processingu dochází k tvorbě elementárních rovnic, sestavení soustav rovnic, aplikaci počátečních podmínek a výpočet vytvořených soustav rovnic.

V poslední fázi přichází na řadu post-processing. Především dochází k zobrazení a exportu výsledků analýzy, které se mohou dále zpracovávat v textových nebo tabulkových programech. Lze také dopočítat závislé parametry, které nebyly nastaveny před samotným výpočtem.

#### 3.1 Diskretizace a základní typy prvků [2], [15], [19], [20], [24], [36]

Jak již bylo zmíněno, v rámci pre-processingu dochází k tvorbě geometrických modelů zkoumaného problému a jejich rozdělení do sítě složené z konečného počtu prvků. Geometrické modely lze importovat z jiných CAD systémů. V tomto případě může ale nastat problém s kompatibilitou a přenosem dat. Další možností je tvorba geometrického modelu přímo v modulu určitého simulačního softwaru. Modely takto vytvořené budou zajisté funkční, ale zabudovaný CAD modul nemá takové možnosti jako programy, které jsou primárně určené pro tvorbu 2D a 3D součástí.

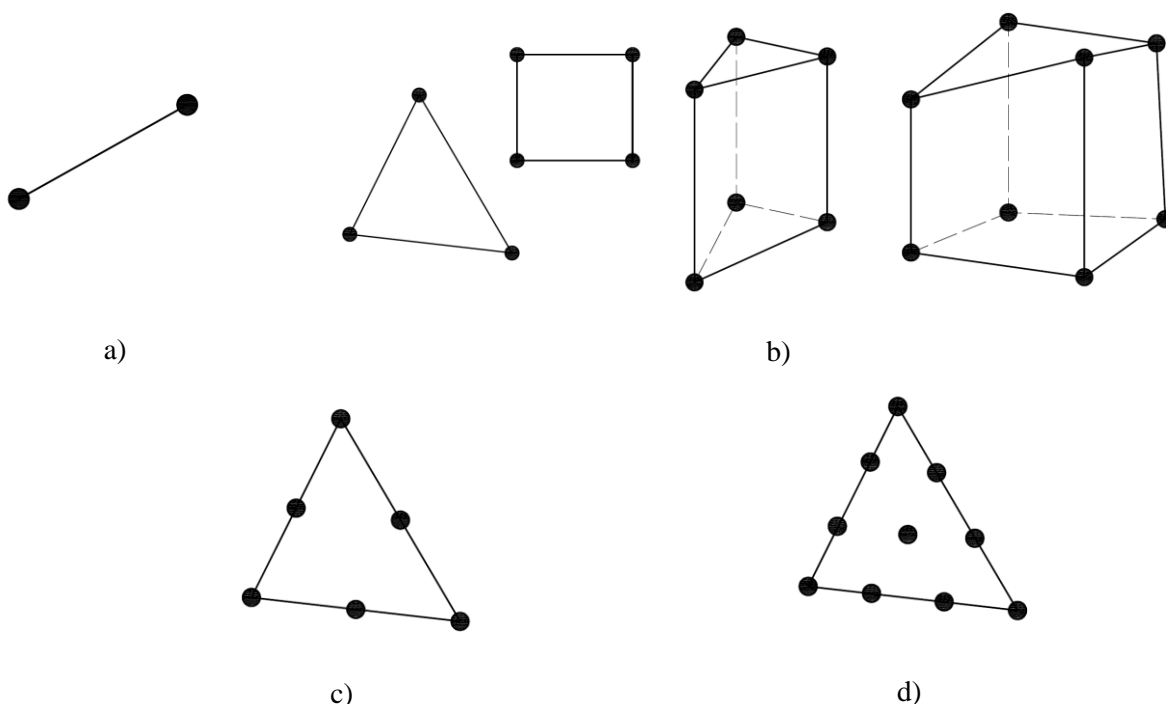
Dalším krokem je rozdělení vytvořené geometrie do sítě konečného počtu prvků. Tvar a velikost prvků se odvíjí od dimenze úlohy a složitosti tvaru pozorovaných objektů. Prvky lze rozdělit např. na základě dimenze výpočtu:

- 1D prvky jsou prvky prutové,
- 2D prvky jsou prvky plošné, např. trojúhelníkové nebo čtyřúhelníkové prvky,
- 3D prvky jsou prvky tělesové, např. čtyřtětň, pětistětň, šestistětň atd.



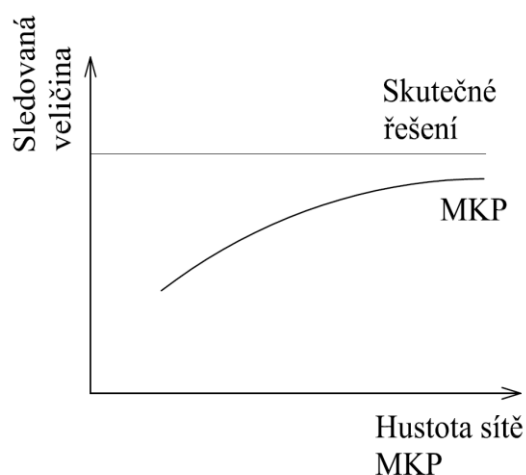
Prvky je možné rozlišovat také z hlediska počtu uzlů:

- lineární prvky (obr. 18a a 18b), mezi které se řadí nosníkový prvek se dvěma uzly, trojúhelníkový prvek se 3 uzly, čtyřúhelníkový prvek se čtyřmi uzly, čtyřstěn se čtyřmi uzly, pětistěn s pěti nebo šesti uzly,
- dále prvky kvadratické, kde nosníkový prvek má tři uzly, trojúhelníkový prvek má devět uzlů (obr. 18c), čtyřúhelníkový prvek osm uzlů, čtyřstěn 10 uzlů, atd. Jedná se v podstatě o přidání jednoho uzlového bodu do hrany lineárního prvku,
- v některých případech lze využít i prvky kubické (obr. 18d).



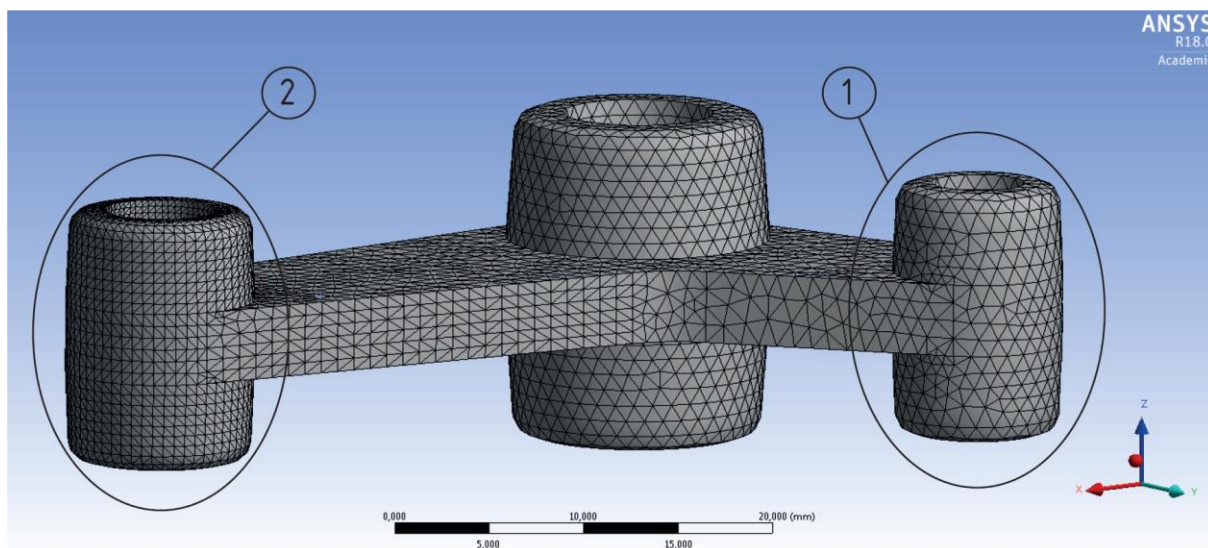
Obr. 18 Možné tvary elementů sítí  
konečných prvků [36]

Tvar elementů a hustota sítě má vliv na přesnost řešení. Se vzrůstající hustotou je řešení přesnější (obr. 19), ale výpočet požadovaných parametrů klade větší nároky na výpočetní techniku. Tyto nároky lze snížit například využitím lokálního zvýšení hustoty sítě (individuální diskretizace). Během samotného procesu výpočtu může docházet k obnovení nadměru zdeformované sítě (remeshing). Díky tomu nedochází k nepřijatelné deformaci elementů a k nežádoucímu předčasnému ukončení výpočtu. Výsledek je hledán ve formě kombinace vhodně zvolených počátečních podmínek a neznámých parametrů. V rámci výpočtu je počítáno s dílčími výsledky od jednotlivých elementů.



Obr. 19 Závislost přesnosti řešení  
na hustotě sítě [24]

Sítě konečných prvků lze aplikovat na model automaticky, nebo manuálně. V případě automatické aplikace sítě se jedná o volnou síť, která je vytvářena na základě algoritmů programu (obr. 20 oblast 1). Při použití manuální sítě zde dochází k ovlivnění tvorby sítě uživatelem (obr. 20 oblast 2). Může se jednat o mapovanou síť, kdy je těleso rozděleno pomocí více druhů makroprvků. Řada případů si žádá kombinaci těchto způsobů. Díky tomu lze dosáhnout vhodnější diskretizace. Makrohrany jednotlivých prvků je možné vytvářet zadáním požadovaného počtu elementů, nebo jejich velikosti. Sítování by mělo být tvořeno s cílem dosažení co nejpřesnějšího popisu daného tělesa.



Obr. 20 Ukázka aplikace sítě  
konečných prvků

### 3.2 Možnosti řešení simulací [2], [6], [19], [20], [24],

Po diskretizaci a kompletním nastavení počátečních podmínek, materiálových modelů a parametrů procesu přichází na řadu výpočet samotné simulace a hledaných charakteristik. Z časového hlediska lze rozeznat dva základní typy úloh, a to statické a dynamické úlohy. Na základě linearit jednotlivých problémů je nutno brát v úvahu další dělení na úlohy lineární a nelineární.

Vzhledem k povaze provedeného experimentu, kdy se vyhodnocoval biaxiální stav napjatosti za dynamických podmínek, budou další informace věnovány čistě nelineárním dynamickým úlohám.

Základní rovnici pro řešení dynamických problémů, při kterých nedochází k žádnému útlumu, je vztah (3.1).

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (3.1)$$

kde:  $\mathbf{M}$  – matice hmotnosti,  
 $\mathbf{K}$  – matice tuhosti,  
 $\mathbf{F}$  – matice zatížení,  
 $\mathbf{U}$  – matice posuvů,  
 $\ddot{\mathbf{U}}$  – matice zrychlení.

V řadě případů je nutné zvážit také vliv tlumení, které se projeví implementací matice tlumení do základní rovnice (3.1) a vznikne následující vztah (3.2).

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (3.2)$$

kde:  $\mathbf{C}$  – matice tlumení,  
 $\dot{\mathbf{U}}$  – matice rychlosti.

Pro úplnost je vhodné zmínit případy vlastního netlumeného kmitání, kdy je zatížení rovno nule. Tento stav je vyjádřen dle vztahu (3.3):

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3.3)$$

K řešení problémů je možné využít jednoho ze dvou algoritmů. Volba se odvíjí od časového průběhu úlohy a také od její složitosti. Pro řešení statických úloh s mírnými nelinearitami je vhodné využít implicitní algoritmus. Naproti tomu pro dynamické děje s výrazně nelineárním chováním je výhodné použití explicitního algoritmu. Zjednodušené srovnání uvedených algoritmů je uvedeno v tabulce 4.

Implicitní způsob spočívá v postupném přírůstkovém řešení problému. K vyjádření posuvů, rychlostí a zrychlení v čase  $t_{n+1}$  využívá hodnot v čase  $t_n$  i v čase  $t_{n+1}$ . Stabilita řešení nezávisí na délce kroku  $\Delta t$ , z toho vyplývá, že schéma je nepodmíněně stabilní. To znamená, že při nevhodně zvolené hodnotě  $\Delta t$  může být vypočítán nepřesný výsledek, a přitom se výpočet může chovat stabilně (výsledky nerostou nekontrolovaně nade všechny meze).

Jestliže jsou setrvačné síly zanedbatelné, lze ze soustavy vypustit matici hmotnosti a problém tak bude řešen jako statická úloha. Pro řešení jednotlivých časových kroků je potřeba opakovaně řešit soustavu rovni včetně aktualizované matice tuhosti. Z toho vyplývá značná časová náročnost u složitějších problémů. Pouze u lineárních úloh s konstantním časovým krokem lze tento proces zjednodušit.

V rámci explicitní metody jsou posuvy v čase  $t_{n+1}$  získávány z pohybové rovnice vztahující se k časovému okamžiku  $t_n$ . Součástí jednoho kroku nejsou žádné iterace, časový krok je pevně dán, tudíž je známá i doba výpočtu. Nevýhodou explicitního řešení je podmíněná stabilita. Z toho vyplývá, že se stabilního výsledku dosáhne při dodržení určitého časového kroku, který splňuje podmínku dle vztahu (3.4):

$$\Delta t < \Delta t_c \quad (3.4)$$

kde:  $\Delta t$  – časový krok [s],  
 $\Delta t_c$  – kritická délka časového kroku [s].

Kritická délka časového kroku je závislá na rychlosti šíření zvuku ve vyšetřovaném prostředí a na velikosti elementů v dané síti. V podstatě se jedná o dobu průchodu napěťové vlny nejmenším prvkem sítě. Tuto hodnotu lze vyjádřit dle Courantova kritéria, které je vyjádřeno vztahem (3.5):

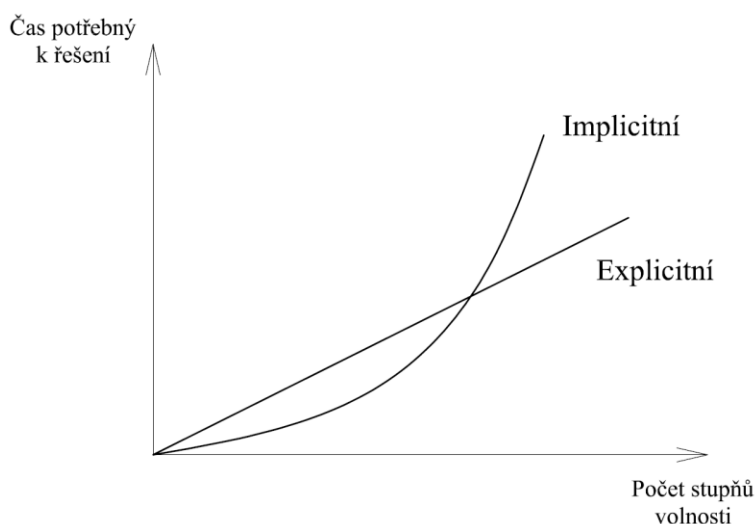
$$\Delta t_c = \frac{h}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (3.5)$$

kde:  $h$  – charakteristický rozměr nejmenšího prvku sítě [m],  
 $\rho$  – hustota materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Časový krok je asi 100 až 1000 krát menší než časový krok implicitního řešení. Z toho vyplývá velký počet kroků při nízké náročnosti výpočtu.

Při výpočtu není možné zanedbat matici hmotnosti. Její zanedbání by vedlo k nepoužitelnosti algoritmu. Tudíž explicitní metody nelze přímo využít k řešení statických úloh. Tento problém lze ale obejít např. umělým zvýšením hustoty. Důsledkem je pokles vlastní frekvence a z toho vyplývající zvýšení přírůstku času. Řešení poté probíhá s nerealistickými setrvačnými silami, ale výhody algoritmu zůstávají zachovány. Setrvačné síly jsou zanedbatelné v porovnání s přetvárnými silami řešené soustavy. Celkově je problém řešen jako dynamický, ale ve skutečnosti se jedná o statické řešení.

Výhoda explicitního řešení se projeví při použití diagonální matice hmotnosti. V takovém případě se řešená soustava rozpadne na samostatné nezávislé rovnice. Z nich lze vyjádřit neznámou již na úrovni prvků bez nutnosti tvorby globálních matic tuhosti a hmotnosti. Z toho vyplývá o několik řádů rychlejší časový krok explicitního řešení oproti odpovídajícímu implicitnímu kroku. Obecně je porovnání časové náročnosti implicitního a explicitního řešení zobrazeno na obrázku 21.



Obr. 21 Obecné porovnání časové náročnosti explicitních a implicitních algoritmů [6]

Tab. 4 Porovnání explicitní a implicitní metody řešení. [20]

	Explicitní	Implicitní
Výhodné pro třídu problémů	rychlé dynamické přechodové děje s výrazně nelineárním chováním, rázová zatížení, rozměrné prostorové úlohy s komplikovanou topologií sítě	statické a kvazistatické děje s mírnějšími nelinearitami typu plasticita apod., rovinné a topologicky jednodušší prostorové sítě
Charakter softwaru	jednoduchý kód, vše ve vnitřní paměti	komplikovanější programy, komunikace s vnější pamětí
Časový krok	malý	typicky 100x až 1000x větší než u explicitního řešení
Požadavky na paměť	malé	velké

### 3.3 Druhy nelinearit [15], [19], [20], [24], [35], [36]

Problematika rozšiřování trubek za dynamických podmínek v sobě nese určité nelinearity. Ať už se bude jednat např. o nelinearity týkající se třecích podmínek, nebo materiálového modelu. V rámci MKP lze nelinearity rozdělit do následujících skupin:

- geometrické nelinearity,
- kontaktní nelinearity,
- materiálové nelinearity.

Nejprve jsou popsány geometrické nelinearity. Při sledování elementu tělesa je nutné brát v úvahu nejen tvarové změny, ale zároveň i posunutí a rotace elementu jako tuhého celku. Geometrická nelinearita je tudíž způsobena velkými posuvy a natočeními, které mohou doprovázet velká přetvoření. Je možno rozlišit dva základní druhy geometrických nelinearit:

- první typ geometrické nelinearity se vztahuje k velkým posuvům, těleso na základě zatížení vykazuje velké posunutí (popř. rotace), ale přetvoření zůstává malé, velké posunutí a natočení s malým přetvořením se vztahují také k jednotlivým objemovým elementům,
- druhým typem geometrických nelinearit jsou velká přetvoření, dochází také k velkým posuvům i rotacím.

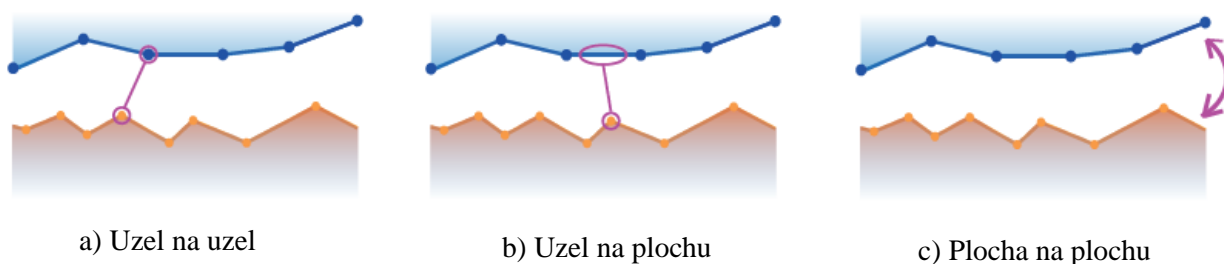
Chování materiálu v obou případech může být lineární, nebo nelineární.

Kontaktní nelinearity se týkají styku dvou těles. V řadě simulačních případů dochází ke kontaktu hranic jednoho tělesa s tělesy jinými. Případy tohoto typu jsou kontaktní úlohy. Jedná se o nelineární problémy, kdy před kontaktem neexistuje žádná kinematická podmínka popisující hranici, ale během kontaktu existuje určitá kinematická vazba, která brání penetraci kontaktních povrchů skrze sebe. Na základě přizpůsobitelnosti hranic těles lze rozdělit kontakt těles následovně:

- kontakt deformovatelného tělesa s deformovatelným tělesem,
- kontakt nedeformovatelného tělesa s deformovatelným tělesem.

Druhý způsob kontaktů je běžný pro simulaci tvářecích procesů, kdy se nástroje považují za nedeformovatelné těleso.(rigid).

Při podrobnějším pohledu na kontaktní vazbu je nutné identifikovat, které hraniční prvky se zúčastňují kontaktu. Jednotlivé vazby jsou zjednodušeně ilustrovány na obrázku 22.



Obr. 22 Typy kontaktů [15]

V průběhu řešení je nutné postupovat krok po kroku a přepočítávat matici tuhosti. V podstatě se jedná o průběžnou změnu okrajových podmínek úlohy. Zabezpečení vzájemného nepronikání těles během simulací lze řešit jednou z následujících dvou metod.

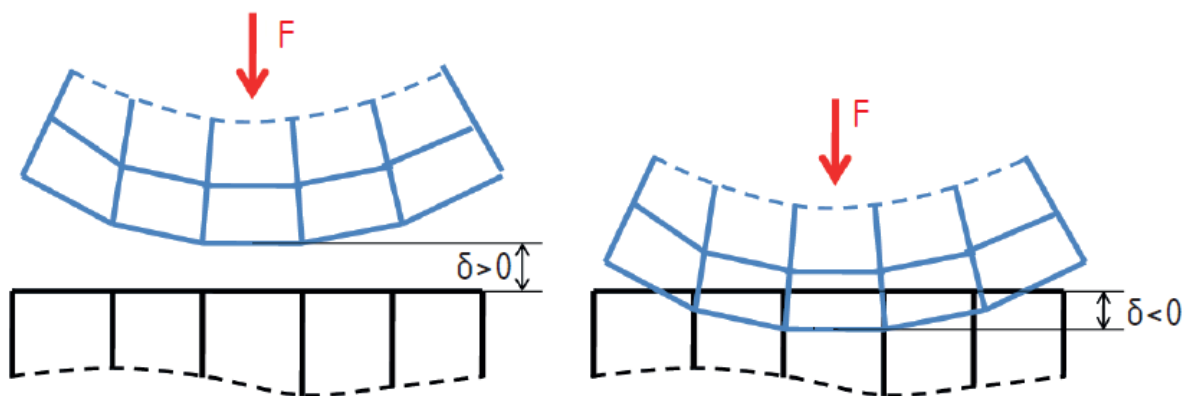
Metoda Lagrangeových multiplikátorů počítá se splněním podmínky nepronikání kontaktních povrchů. Základní rovnice dle vztahu (3.6).

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} - \delta_0 = 0 \quad (3.6)$$

kde:  $\mathbf{G}$  – matice definující odpovídající dvojice deformačních parametrů,  
 $\delta_0$  – matice počátečních kontaktních mezer.

Do výpočtu je zaveden tzv. multiplikátor  $\lambda$ , jehož fyzikální význam je kontaktní tlak mezi tělesy. Výhodou metody je, že je splněna podmínka neprostupnosti povrchů a není potřeba definovat kontaktní tuhost. Nevýhoda této metody spočívá právě v zavedení multiplikátoru, který vnáší do výpočtu další neznámý parametr, čímž se výpočet stane složitějším. Dále je metoda citlivá na změny stavu v kontaktu. Je vhodné tuto metodu využít spíše pro 2D a jednodušší 3D úlohy.

Další metodou je pokutový přístup (Penalty method, obr. 23), který funguje na principu skokové změny tuhosti na základě velikosti penetrace kontaktních prvků stýkajících se těles.



Obr. 23 Pokutový přístup [19]

Během simulace se kontakt projeví změnou tuhosti prvků matice tuhosti soustavy. Tuhost v kontaktu se nastaví tak, aby byla dosažena rovnost dle vztahu (3.7):

$$F = k_p \cdot \delta \quad (3.7)$$

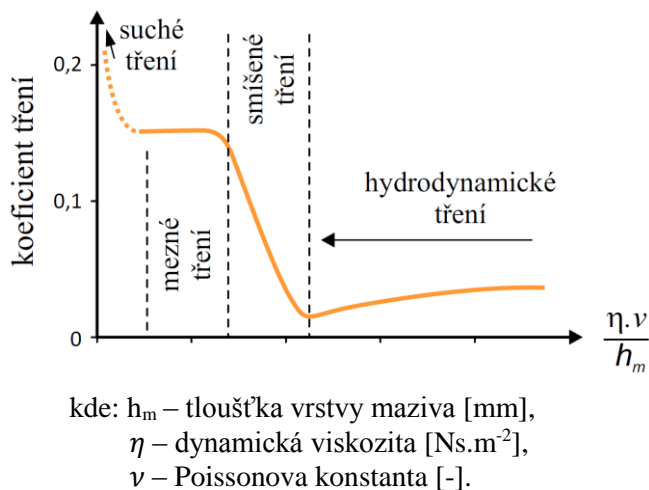
kde:  $k_p$  – tuhost v kontaktu [ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ ],  
 $\delta$  – vzdálenost kontaktu [mm].

Výhodou této metody je spolehlivost při iteračním řešení rozsáhlých soustav rovnic. Dále nedochází ke změnám v počtech stupňů volnosti. Nevýhoda se projevuje při příliš nízké hodnotě tuhosti, kdy dojde k vysoké penetraci a následným nepřesným výsledkům. Naopak při vysokých hodnotách dochází k oscilacím mezi stykovými body – střídá se periodicky otevřený/uzavřený kontakt.

Při vzniku kontaktů těles je vhodné zahrnout do simulací vliv tření. Tření je definováno jako odpor proti relativnímu pohybu dvou stýkajících se těles. V důsledku ovlivňuje velikost tvářecí síly, tok materiálu při tváření a s tím spojenou deformaci materiálu.

V rámci tření může nastat několik stavů, které popisuje Striebeckův diagram (obr. 24). Jedná se o:

- suché tření, které je charakteristické přímým stykem povrchových nerovností bez přítomnosti maziva,
- mezní tření, při kterém dochází k částečnému přímému kovovému kontaktu a porušení tenkého mazacího filmu, který je tvořen vrstvou molekul kapalin nebo plynů, případně látek vzniklých chemickou reakcí povrchů,
- hydrodynamické tření, nastává při dokonalém oddělení stykových ploch vrstvou kapaliny, která se řídí dle zákonů hydrodynamiky,
- smíšené tření, které tvoří přechod mezi hydrodynamickým a mezním třením.



Obr. 24 Striebeckův diagram [22]

Pro simulace lze využít tří základních přístupů zohledňujících tření. První přístup určuje třecí napětí na základě normálové složky napětí a koeficientu tření. Jde o Coulombův model a je popsán vztahem (3.8).

$$\tau_{koh} = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.8)$$

Koeficient tření  $\mu$  je závislý na materiálu, vlastnostech styčných ploch (použití maziva, drsnost), rychlosti pohybu styčných ploch a tlaku. Hodnotu koeficientu lze uvažovat od 0 do 0,577, kdy 0 označuje stav bez tření a hodnota 0,577 stav přilnutí kontaktních ploch.

Druhým přístupem je přístup adhezní. Je definován jako součin meze kluzu ve smyku a třecího faktoru  $m$ , viz rovnice (3.9).

$$\tau_{ad} = m \cdot \sigma_k \quad (3.9)$$

kde:  $m$  – třecí faktor [-].

Třecí faktor může nabývat hodnoty od 0 do 1, kdy hodnota 0 značí proces bez tření a hodnota 1 znamená úplné přilnutí materiálu (adheze).

Třetí model je kombinací dvou předchozích, kdy se dávají do souvislosti oba dva modely a hledá se jejich minimum (3.10)

$$\tau = \min\{\tau_{koh}; \tau_{ad}\} \quad (3.10)$$

Posledním zmíněným druhem nelinearity jsou nelinearity materiálové. Představují případy, kdy vztah mezi napětím a přetvořením není lineární, jako je tomu u některých elastických modelů materiálů.

Nelineární elastické materiálové modely se vztahují k popisu chování pryží, pěn, plastů a biomateriálů. Uvedené materiály se vyznačují velkou hodnotou vratných změn (např. u pryží až 500 %). Vykazují velmi nelineární závislost mezi napětím a deformací. Vzhledem k chování kovových materiálů vůči tlakovému, tahovému, nebo smykovému zatěžování vykazují

hyperelastické materiály rozdílné odezvy. Za účelem získání materiálových konstant těchto materiálů je třeba vyhodnocovat výsledky z různých experimentů (jednoosý tah, smyk, dvojosá napjatost).

Důvodem vzniku nelinearity je dále elasticko-plastické chování materiálů. K elasticko-plastickému chování dochází při překročení meze pružnosti. Začne tak vznikat trvalá deformace, která po odlehčení zatěžované součásti nezmizí. Děje se tak na základě zákona odpružení po trvalé změně tvaru, který je popsán rovnicí (3.11) a znázorněn obrázkem 25.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (.)$$

kde:  $\varepsilon_{el}$  – elastická (vratná) deformace [-],  
 $\varepsilon_{pl}$  – plastická (trvalá) deformace [-].

Pro zahájení trvalé plastické deformace je potřeba splnit podmínku plasticity. Lze využít jednu ze dvou podmínek:

- Trescova podmínka (podmínka  $\tau_{max}$ ),
- podmínka HMM.

Trescova podmínka představuje v Haighově prostoru šestiboký hranol (obr. 26a). Plastická deformace nastane, jestliže maximální smykové napětí dosáhne mezní hodnoty dle vztahu (3.11).

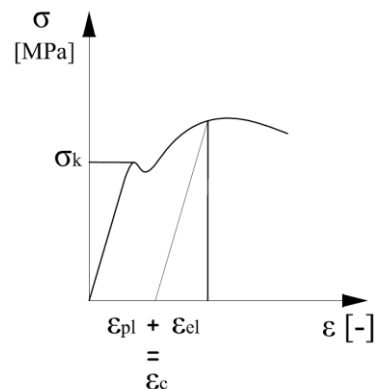
$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min}) = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3.11)$$

kde:  $\sigma_1, \sigma_3$  – hlavní osová napětí [MPa],  
 $\sigma_{max}$  – maximální hodnota napětí [MPa],  
 $\sigma_{min}$  – minimální hodnota napětí [MPa].

Podmínka HMM je v Haighově prostoru znázorněna válcovou plochou (obr. 26b). Po dosažení efektivního napětí definovaném rovnicí (3.12) dochází k plastické deformaci.

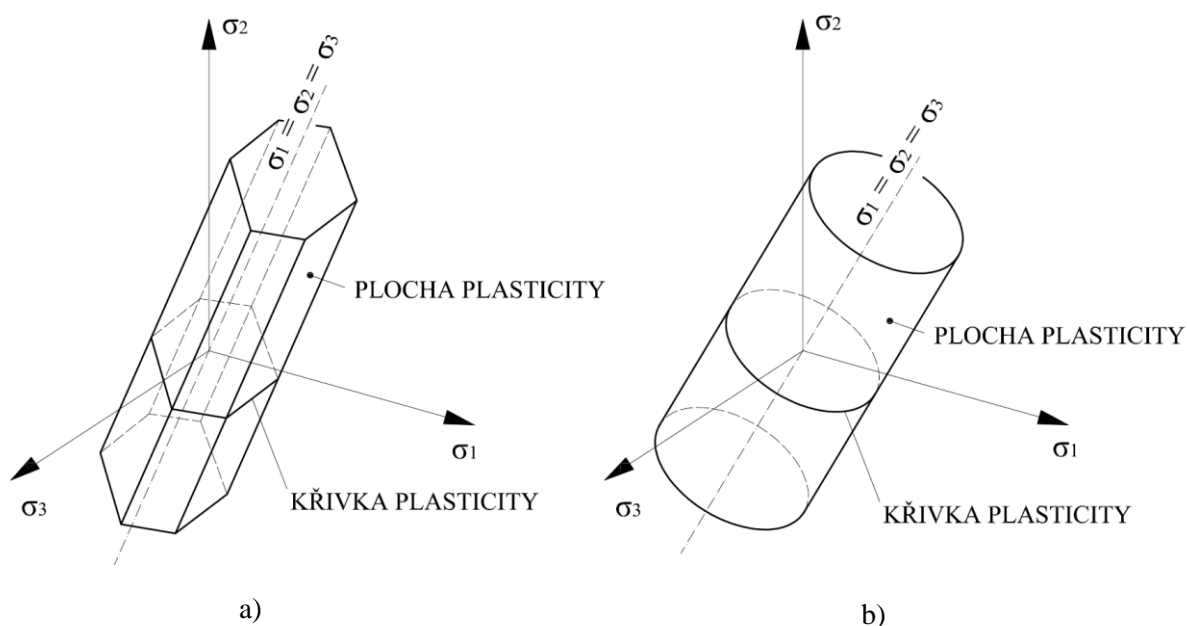
$$\sigma_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.12)$$

kde:  $\sigma_2$  – hlavní osová napětí [MPa].



Obr. 25 Zákon odpružení po trvalé změně tvaru [35]



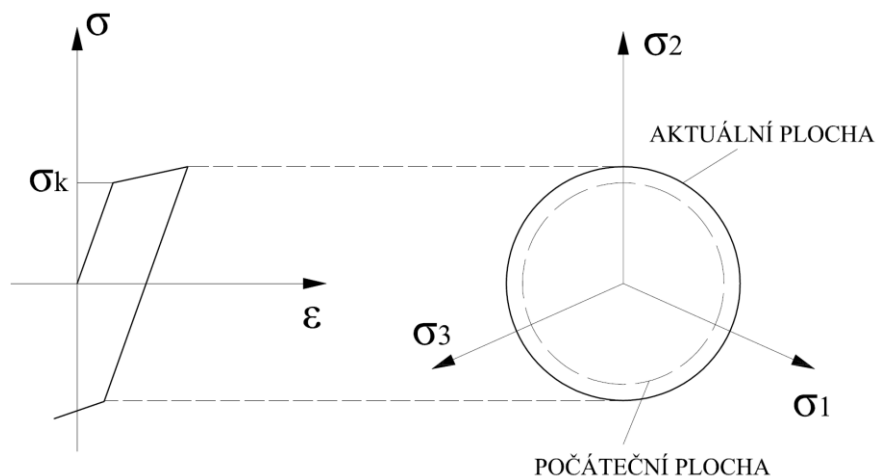


Obr. 26 Podmínky plasticity  
v Haighově prostoru [35]

Průběh elasticko-plastických materiálových modelů se také odvíjí od rychlosti zatěžování. Při vyšších rychlostech se materiál chová jinak než při kvazistatickém zatěžování. Na základě tohoto poznatku lze elasticko-plastické chování rozdělit jako:

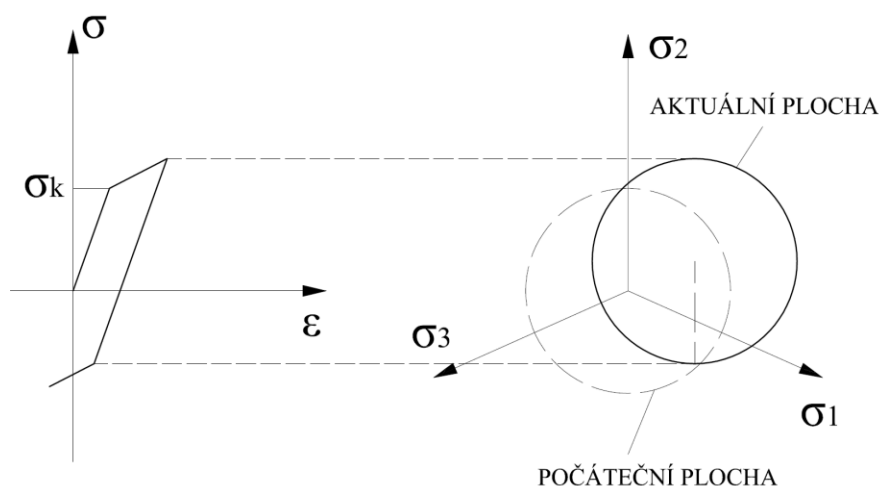
- časově nezávislé elasticko-plastické chování,
- časově závislé elasticko-plastické chování.

Během časově nezávislé elasticko-plastické deformaci dochází ke zpevňování materiálu. Toto zpevňování může být izotropní, kdy nedochází k ovlivnění polohy plochy plasticity, ale pouze ke změně jejího poloměru (obr. 27). Izotropní zpevňování je vhodné pro popis monotónních dějů (např. kování, nebo tažení).



Obr. 27 Izotropní zpevňování [19]

Dalším druhem zpevňování je zpevňování kinetické, kdy dochází ke změně polohy osy plasticity, ale poloměr zůstává konstantní (obr. 28). Model se využívá k popisu chování při zatížení cyklického charakteru. Posledním druhem zpevňování je kombinované, kdy dochází ke kombinaci dvou výše uvedených druhů.

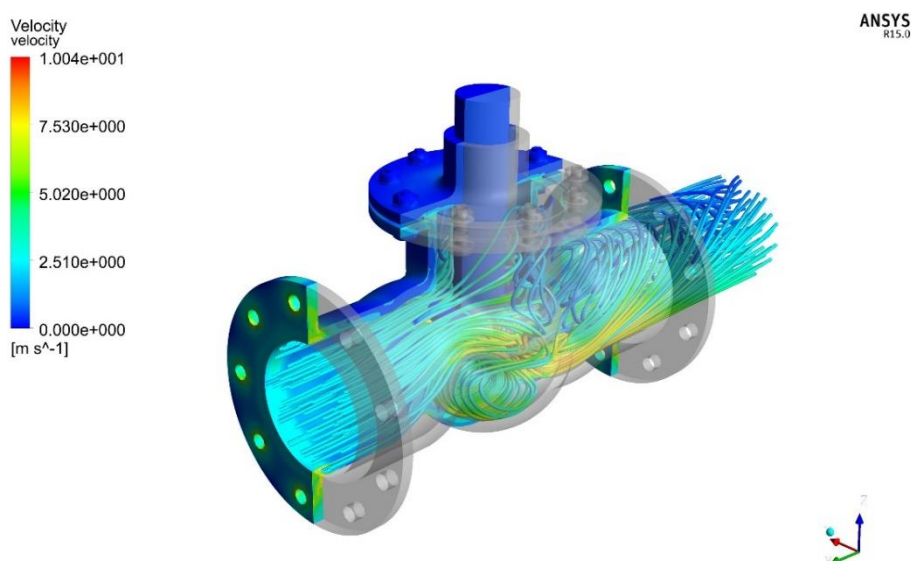


Obr. 28 Kinetické zpevňování [19]

Mimo elasticko-plastické modely, lze popsat modely visko-elastické, které zahrnují elastické a viskozní (nevratné, časově závislé deformace). Při působícím napětí vzniká konstantní elastická složka deformace. Viskózní složka se mění s časem. Za účelem popisu těchto materiálů se zavádí tzv. reologické modely. Řešení bývá složitější než u tuho-plastických nebo pružně-plastických modelů.

### 3.4 Základní popis simulačního programu [3], [12], [21]

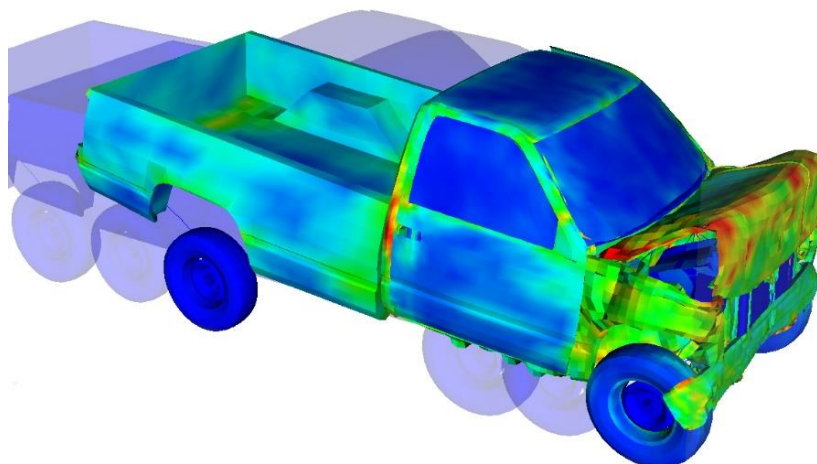
Pro simulační zpracování experimentu byl zvolen program ANSYS, a to z důvodu vysoké technické úrovně programu a dostupnosti. ANSYS se řadí k simulačním programům, které nacházejí uplatnění například ve strojírenství, automobilové a dopravní technice, energetice, nebo v biomechanice. Lze jej s výhodou použít k analýze řady problémů, ať už k silové analýze,



Obr. 29 Simulace proudění v potrubí [13]

simulaci vibrací, hydrodynamickým výpočtům, termální analýze, proudění (obr. 29), nebo také k optimalizacím. Program využívá metodu konečných prvků (Finite Element Method). Pomocí softwaru lze řešit jak statické, tak i dynamické úlohy. Je možné provádět lineární i nelineární mechanické analýzy. V rámci schopností programu je také popsáno stavení materiálu, kdy dochází ke vzniku trhlin a jejich šíření. Velkou výhodou programu ANSYS je možnost propojení jednotlivých modulů. Díky tomuto lze získávat komplexní informace o složitých soustavách, které by byly jinými softwary téměř neřešitelné.

K simulaci experimentu je nejvhodnější využít ANSYS Mechanical. Tento program umožňuje, mimo jiné, simulaci strojních součástí pracujících za statických, nebo dynamických (obr. 30) podmínek. Software je vybaven implicitními i explicitními algoritmy řešení daných problémů. Díky vybavenosti programu je možné využít některý z řady materiálových modelů, které umožňují popsat chování součástí za konkrétních podmínek co nejpřesněji.

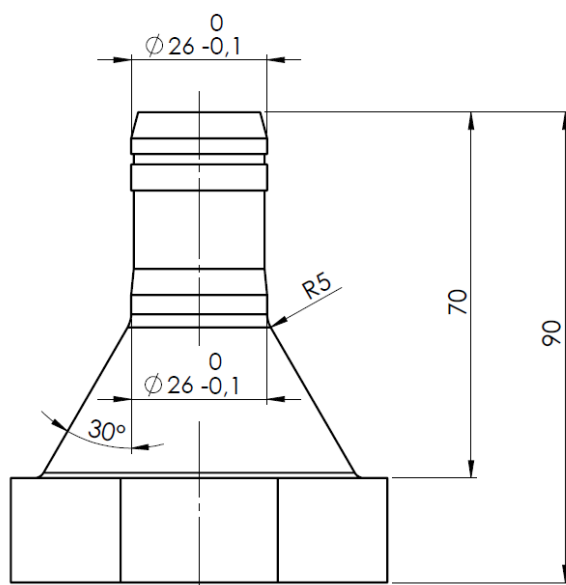


Obr. 30 Simulace crashtestu [12]

## 4 PROVEDENÍ EXPERIMENTU [8], [11], [26], [39]

Výsledky získané z experimentu, při kterém byl zkoumán biaxiální stav napjatosti u rozšiřovaného konce trubky, byly následně ověřeny simulací MKP. K operaci rozšiřování byl využit nepohyblivý kuželový trn (obr. 31). Tato technologie byla zvolena z důvodu snazšího snímání zkoumaného místa a následného vyhodnocování zjišťovaných charakteristik. Dalším důvodem byla konstrukční jednoduchost sestavy.

Experiment proběhl na půdě Leteckého ústavu VUT v Brně. Sestava padostroje se skládala z beranu, vodících lišt a základny, na které byl umístěn tvářecí trn se zarážkami (obr. 33 a obr. 35 pozice 1), na který se nanášelo před každým měřením plastické mazivo.



Obr. 31 Geometrie tvářecího trnu [26]

Celému měření předcházela příprava vzorků (obr. 32). Jednalo se o nanesení bílé podkladové barvy na část trubky, která byla snímána vysokorychlostními kamerami. Poté se na bílou barvu naněsly černé patterny, aby se docílilo kontrastních segmentů důležitých pro snímání deformace. Pattern se deformuje zároveň s deformovaným objektem.

Průběh experimentu se skládal ze zdvihu beranu do určité výšky. Převážně byla volena výška 1 metr a 0,8 metru. Poté došlo ke spuštění beranu a jeho dopadu na trubku. Rychlosti dopadu lze určit pomocí rovnice zákona zachování energie (4.1).



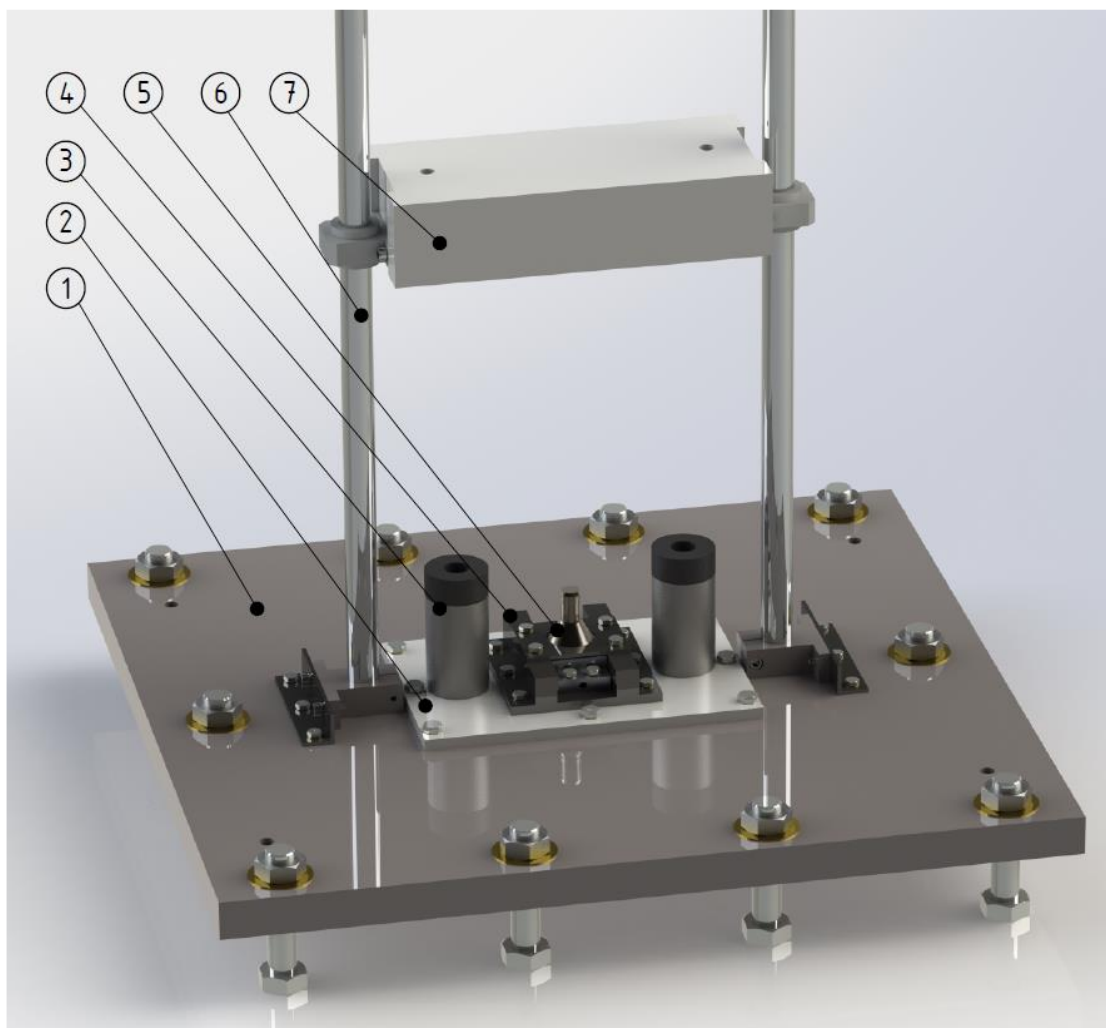
Obr. 32 Zkušební vzorky před nanesením patternu

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h \quad (4.1)$$

kde:  $m$  – hmotnost beranu [kg],

$g$  – gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

$h$  – vzdálenost plochy beranu od čela trubky [m].



- 1 – Základní deska
- 2 – Podložka
- 3 – Vymezovací doraz
- 4 – Držák
- 5 – Tvářecí trn
- 6 – Vodičí tyč
- 7 – Beran

Obr. 33 Model zkušební aparatury

Simulace byla provedena pro vzorky s výškou dopadu beranu 0,8 metru. Výpočet rychlosti je následující:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,8}$$

$$v \cong 3,962 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vzorek se deformoval dle geometrie trnu. Po dopadu beranu na zarážky měření skončilo. Průběh byl zaznamenán dynamometrem a systémem ARAMIS (obr. 34).

ARAMIS se řadí mezi bezkontaktní měřicí systémy sloužící k měření 3D deformací (obr. 35 pozice 2). Systém se skládá z CCD kamer a ze dvou LED diodových světel. V případě experimentu byly využity světla přídavná (obr. 35 pozice 3), protože původní osvětlení nemělo dostatečnou intenzitu.

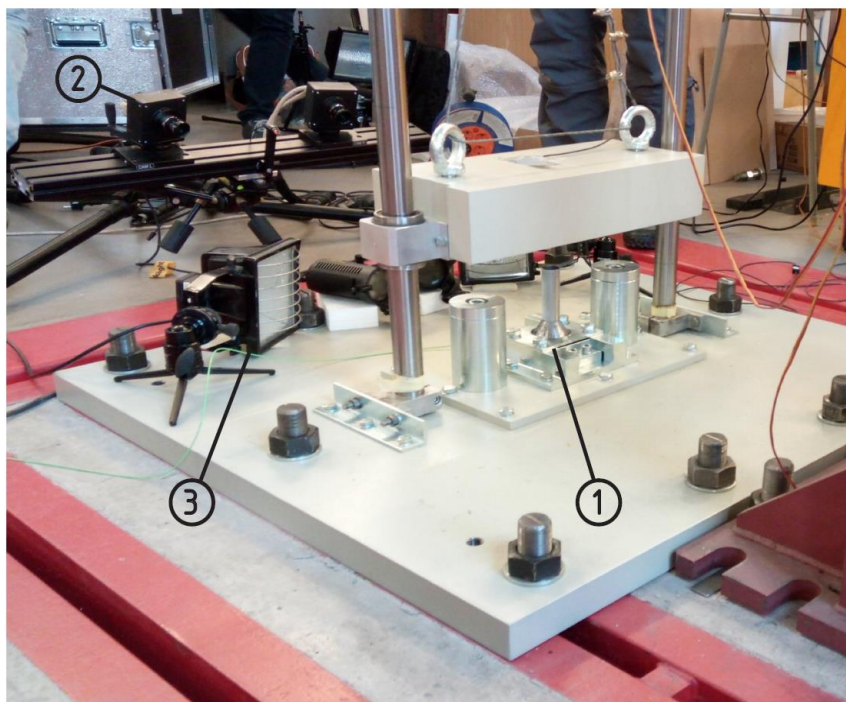


Nejprve si systém nasnímá pozorovanou oblast a rozčlení ji na malé podoblasti (řádově pixely). Z nich poté vyhodnotí stupně šedi, tzn. rozložení černé a bílé barvy v jednotlivých podoblastech. Je vytvořena trojúhelníková síť s uzlovými body. Během tváření dochází k porovnávání těchto bodů v jednotlivých snímcích. Maximální rychlost snímání může dosahovat hodnoty až 4000 snímků za vteřinu a lze snímat objekty o velikosti jednotek milimetrů čtverečních až jednotek metrů čtverečních.



Obr. 34 Měřicí systém ARAMIS [8]

Výstupy měření mohou být v podobě hodnot materiálových charakteristik, hlavních a vedlejších deformací, průběhů napětí a další. Vše lze s přesností graficky vizualizovat.



Obr. 35 Experimentální aparatura před provedením měření

Souběžně se systémem ARAMIS probíhal záznam síly pomocí dynamometru KISTLER, konkrétně byl použit model 9107A (obr. 36). Jedná se o piezoelektrický snímač opatřený krystalem křemíku. Parametry konkrétního typu jsou součástí tabulky 5.

Funkce tohoto snímače spočívá v piezoelektrickém jevu, kdy vlivem mechanické deformace krystalu dochází k elektrické polarizaci. Tím dochází ke vzniku zdánlivých nábojů, které mohou díky přiloženým elektrodám tvořit náboje skutečné. Velikost náboje je přímo úměrná stlačení krystalu. Na základě tohoto jevu se dále vypočítává síla.



Obr. 36 Dynamometr KISTLER [1]

Tab. 5 Údaje uvedené výrobcem dynamometru KISTLER. [16]

Rozsah měření	[kN]	0 - 700
Přetížení	[kN]	770
Tuhost	[kN.μm <sup>-1</sup> ]	26
Kapacitance	[pF]	203
Hmotnost	[g]	370
Vnější průměr	[mm]	40,5
Vnitřní průměr	[mm]	75,5
Výška	[mm]	17
Rozsah provozních teplot	[°C]	-40 - 120

Během experimentu bylo deformováno deset vzorků s tloušťkou stěny 1 mm a dvanáct vzorků s tloušťkou stěny 1,5 mm. Původně byl experiment prováděn s pádem beranu z výšky 1 m (vzdálenost od čela trubky po plochu beranu). U části vzorků s tloušťkou stěny 1 mm ale docházelo k praskání trubky v okolí svaru (obr. 37). Proto byla snížena počáteční výška beranu na 0,8 m. U řady vzorků s tloušťkou stěny 1,5 mm docházelo k nedolísování.

Vzorky vybrané pro simulaci provedeného experimentu měly označení DA8 a DB9 (tab 6, obr. 38a a 38b). Tyto vzorky byly tvářeny za stejných podmínek. Docházelo k jejich předpokládanému rozšíření a nevykazovaly trhliny.



Obr. 37 Vzorek DA1 s trhlinou



a)



b)

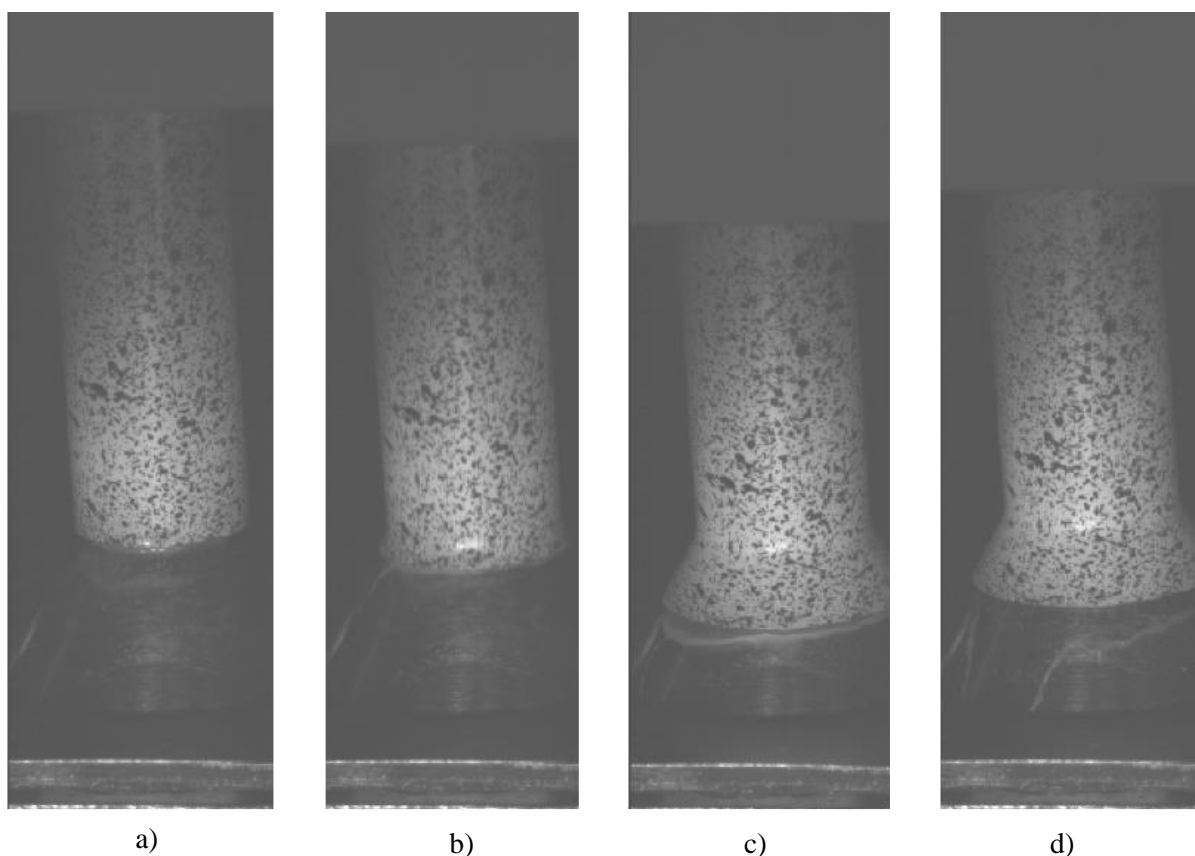
Obr. 38 Vzorky DA8 a DB9 po deformaci

Tab. 6 Údaje týkající se simulovaných vzorků.

		DA8	DA9
Tloušťka stěny	[mm]	1	1,5
Výška spuštění beranu	[m]	0,8	0,8
Posuv trubky	[mm]	15	15
Trhlina		NE	NE

#### 4.1 Zkušební vzorek DA8

První část experimentu byla zaměřena na sledování deformace vzorků označených DA. Takto označené vzorky byly trubky s tloušťkou stěny 1 mm. Pro tvorbu simulace byl zvolen vzorek DA8. Zpracovány byly hodnoty ze systému ARAMIS (obr. 39, 40, 41 a 42) a dynamometru KISTLER (obr. 43). Na základě získaných údajů je vytvořena simulace v programu ANSYS.

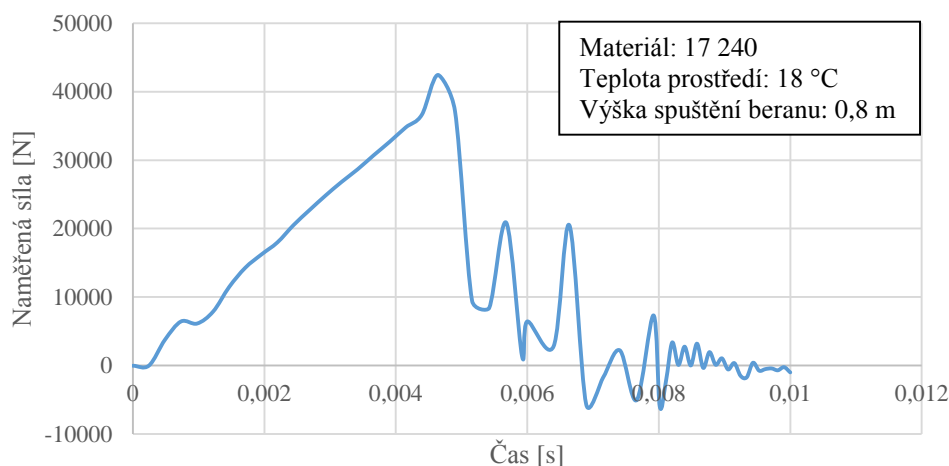


Obr. 39 Vzorek DA8 během deformace

Průběh rozšiřování trubky DA8 je znázorněn na obrázku 39. V části 39a je zaznamenán počátek deformace, kdy trn dosedne na čelo trubky a začne ji tlačit dolů. Na obrázku 39b již dochází k rozšiřování spodní části trubky, která je pomocí energie beranu nasouvána na trn. Obrázek 39c zachycuje moment, kdy hodnota síly vykazuje maximum, trubka dosáhla svého maximálního rozšíření a beran dosedl na zářezky. Ve spodní části trubky dochází k vytlačení maziva. U některých vzorků docházelo k ovlivnění měření mazivem, kdy vlivem nárazu beranu došlo k uvolnění maziva z původního prostoru a jeho přemístění na snímaná místa. Poslední část obrázku 39d zobrazuje odpružení trubky a ukončení jejího dalšího rozšiřování.

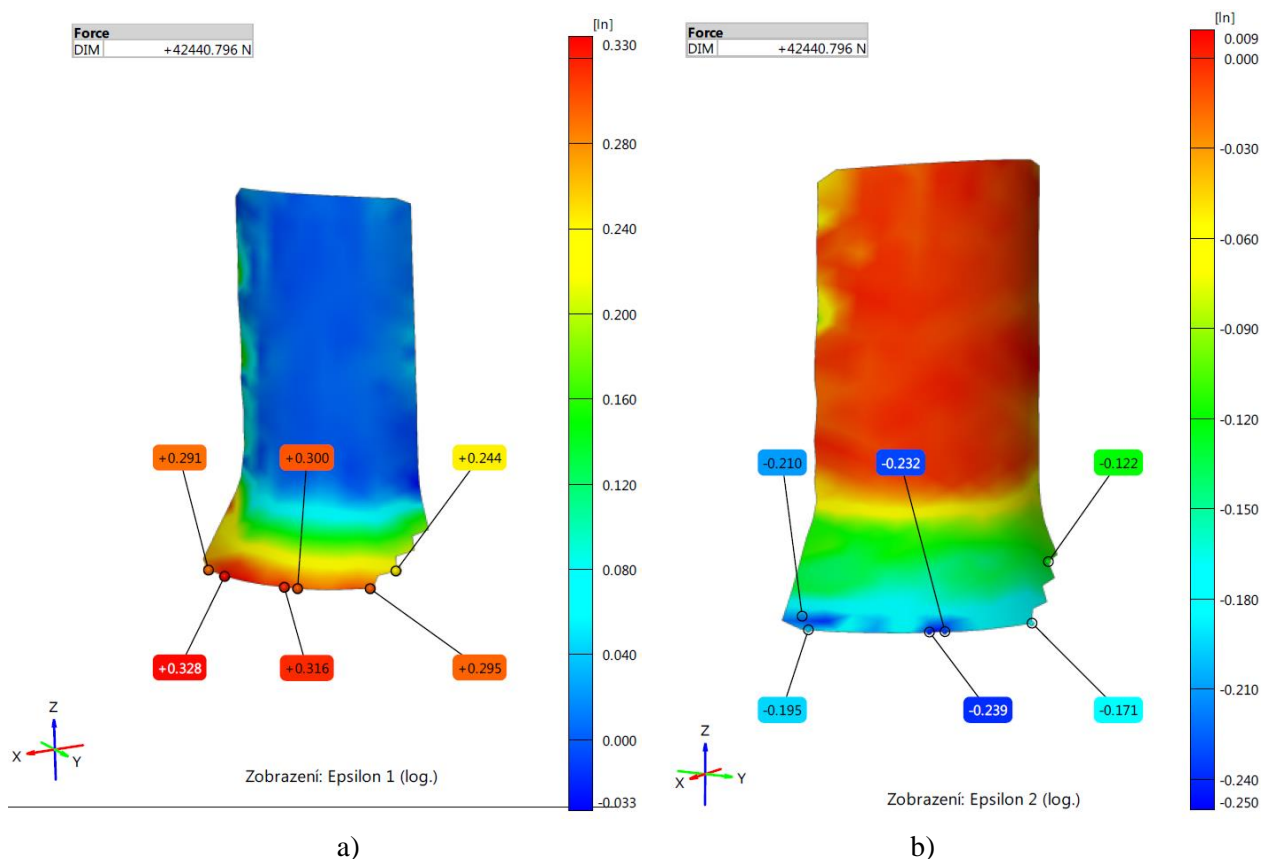


Na základě snímků získaných vysokorychlostními kamerami bylo možné získat průběh síly v závislosti na čase, hodnoty maximálních přetvoření v hlavních směrech a také průběh přetvoření v závislosti na čase. Na obrázku 40 je znázorněn průběh síly od okamžiku, kdy beran dosedá na čelo trubky, rozšiřuje ji, dopadá na zářežky, až do okamžiku ustálení celé soustavy. Maximální síla dosahovala hodnoty 42 440 N.



Obr. 40 Průběh síly v závislosti na čase – vzorek DA8 (ARAMIS)

Snímky pořízené systémem ARAMIS dále sloužily jako zdroj informací pro vyhodnocení hlavních přetvoření. Byly získány hodnoty logaritmických přetvoření, kde obvodové přetvoření je zobrazeno na obrázku 41a, radiální logaritmické přetvoření na obrázku 41b a normálové logaritmické přetvoření na obrázku 42.

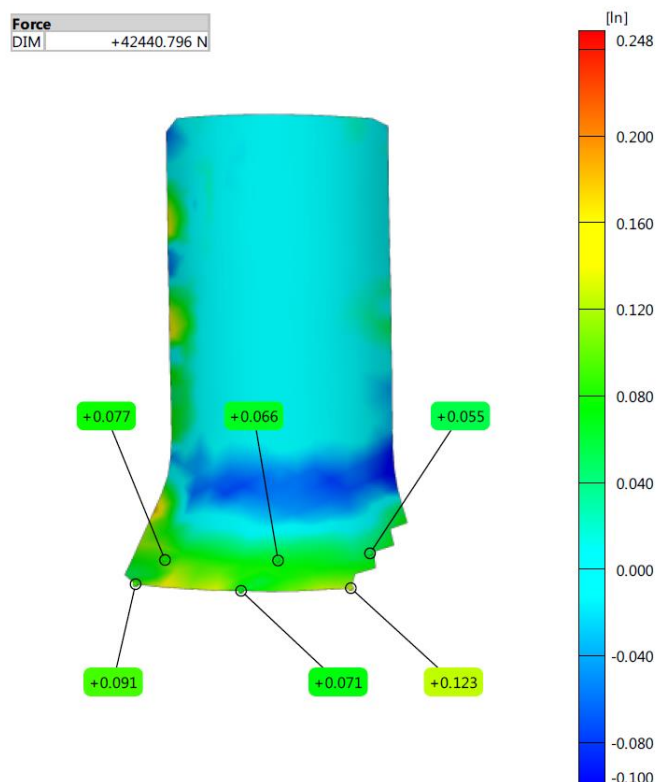


Obr. 41 Přetvoření v okamžiku dosažení maximální síly (DA8)

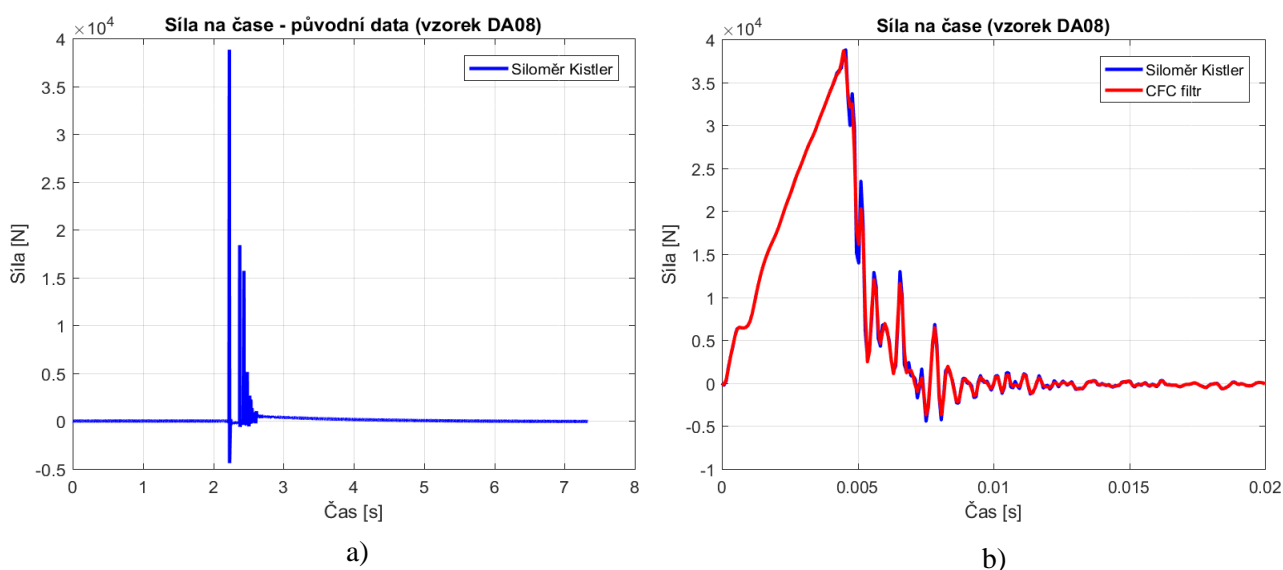
Isoplochy přetvoření byly sestavovány pro určitou obdélníkovou oblast, která byla posunutá od hrany trubky o určitou vzdálenost (cca 2 mm). To z toho důvodu, aby se zabránilo přílišnému ovlivnění výsledku např. uniklým mazivem, nebo nečistotami. Pokud ale došlo k zakrytí patternu, tato oblast se nevykreslila a byla nahrazena plochou šedé barvy. Dále mohou být snímky dané oblasti ovlivněny také odlesky.

Průběh celého experimentu byl také zaznamenán pomocí dynamometru. Výstupem tohoto zařízení byla závislost síly na čase. Naměřený průběh je vykreslen v grafu na obrázku 43a. Jedná se o nefiltrovaný záznam síly, který je vhodné dále zpracovat.

Výsledný záznam byl zpracován v programu MATLAB. K vyhlazení zpracovaných křivek byl použit CFC filtr. Výsledek v porovnání s původní křivkou je znázorněn na obrázku 43b. Jedná se o úsek experimentu, kdy dochází ke kontaktu beranu s čelem trubky. Následně dochází k nárůstu síly vlivem stlačování trubky beranem a rozšiřování pomocí trnu. Po stlačení trubky o určitou hodnotu nastává zastavení beranu o zářezky a ustálení celé soustavy. Maximální naměřená hodnota síly byla 38 821 N.



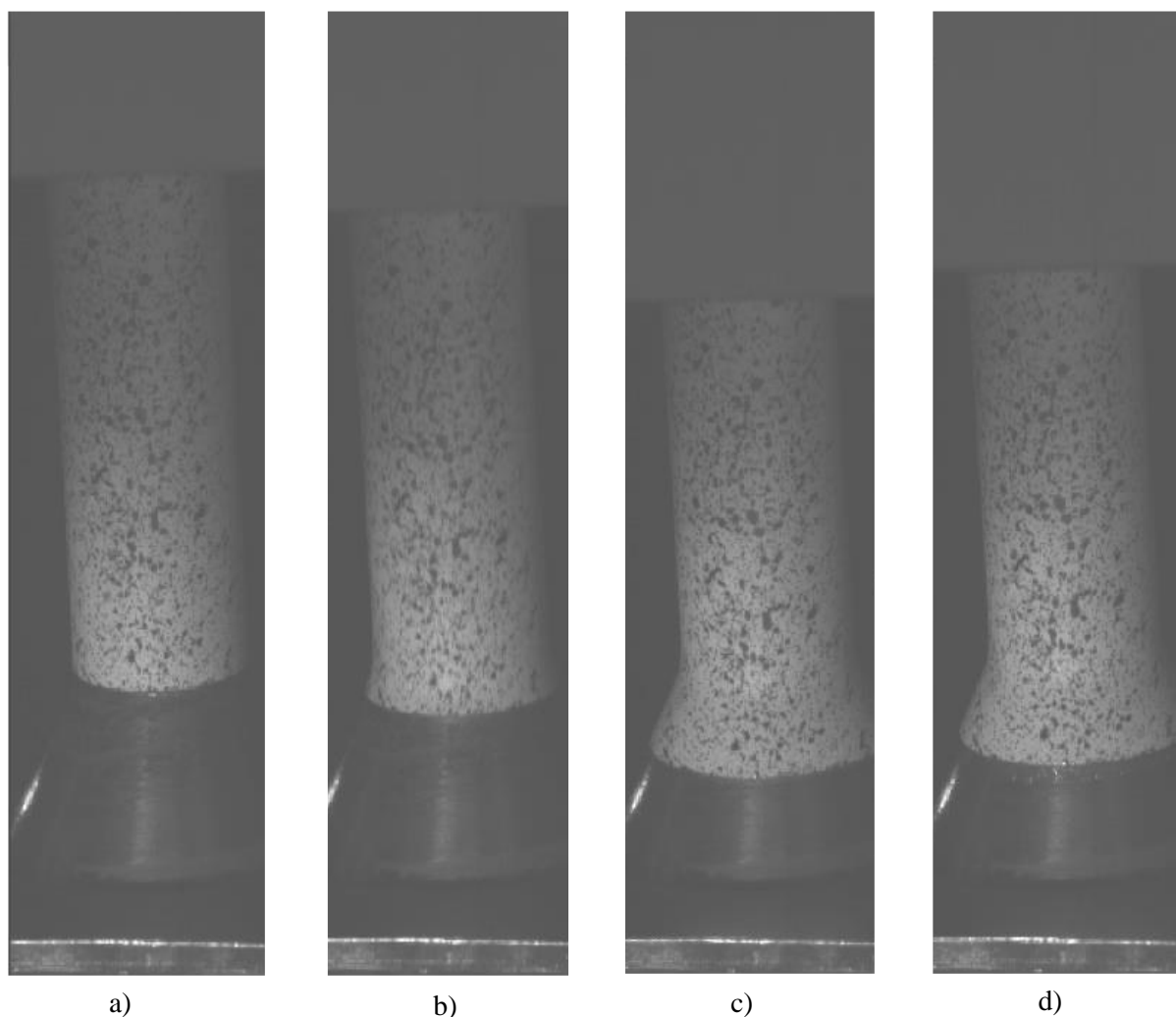
Obr. 42 Přetvoření v normálovém směru v okamžiku dosažení maximální síly (DA8)



Obr. 43 Záznamy získané pomocí dynamometru (DA8)

## 4.2 Zkušební vzorek DB9

Druhá sada vzorků byla označena DB. Tloušťka stěny zkušebních trubek byla 1,5 mm. Při samotném rozšiřování nenastalo u více než poloviny vzorků požadované rozšíření. V podstatě došlo k nedolisování. Z této sady byla vybrána zkušební trubka s označením DB9, která byla dolisována a nevykazovala žádnou trhlinu. Průběh deformace je znázorněn na obrázku 44.



Obr. 44 Vzorek DB9 během deformace

Počátek deformace, kdy beran dosedne na čelo trubky, je zaznamenán na obrázku 44a. Dále dochází k rozšiřování trubky a posunu beranu dolů (viz obr. 44b). Poloha trubky, kdy beran dosedl na zářáčky a byla naměřena maximální síla, je znázorněna na obrázku 44c. Obrázek 44d zachycuje moment, kdy dochází k odpružení trubky a následným vibracím celé soustavy.

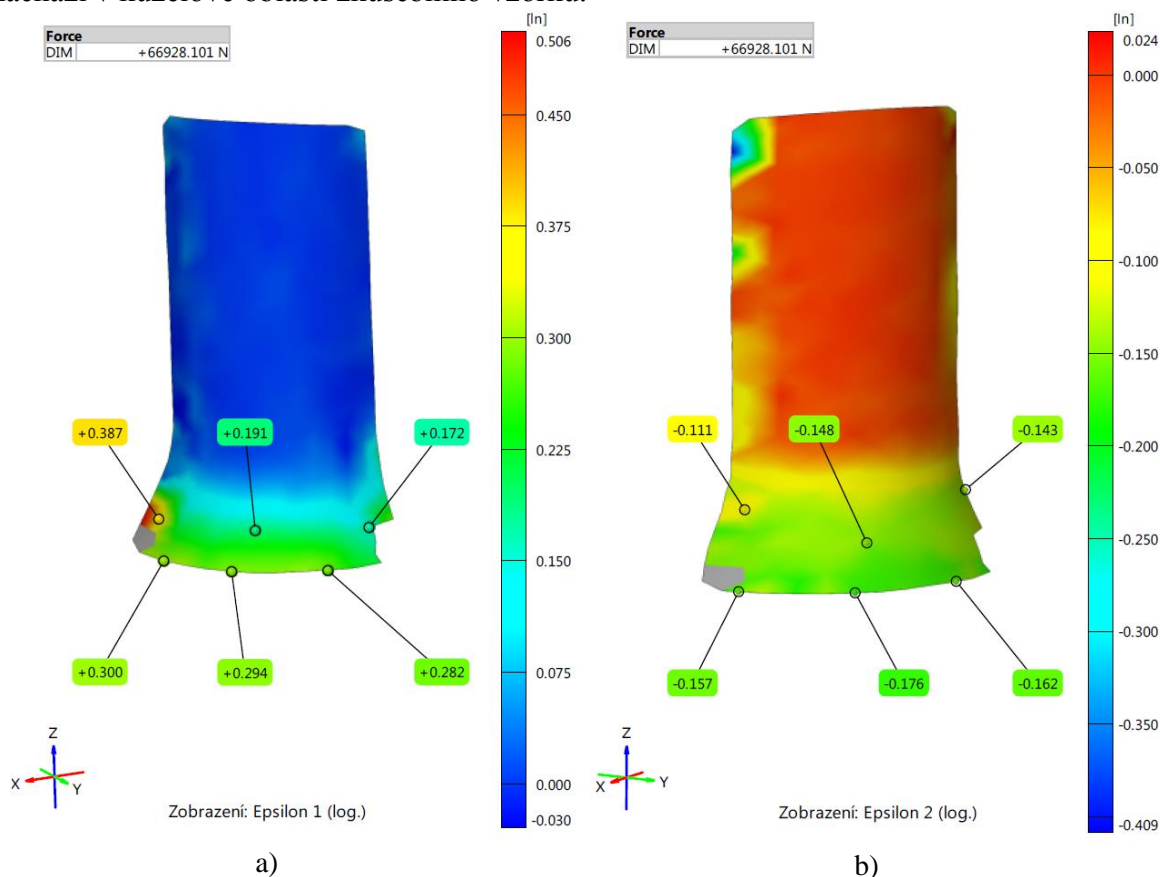
Záznam průběhu síly byl taktéž získán pomocí systému ARAMIS a pomocí dynamometru KISTLER. Na základě údajů získaných pomocí vysokorychlostních kamer byla sestavena závislost síly na čase s průběhem odpovídajícím obrázku 45. Maximální síla dosahovala hodnoty 66 928 N. Ve srovnání se vzorkem DA8 tato síla vzrostla o více než 20 kN. Kromě síly nastala změna i v celkovém čase hlavního silového zatížení vzorku. Zatímco u zkušební trubky DA8 byla dosažena hlavní hodnota síly přibližně v čase 0,0045 s od začátku zatěžování, u vzorku DB9 se tento okamžik pohyboval okolo 0,005 s od počátku působení síly.



Obr. 45 Průběh síly v závislosti na čase – vzorek DB9 (ARAMIS)

Dalším krokem vyhodnocování údajů pořízených systémem ARAMIS je vizualizace průběhu přetvoření v momentě působení maximální síly (viz obr. 46). Z obrázků je zřejmé, že došlo k ovlivnění oblasti snímání nečistotami. Důsledkem je šedá oblast a lokální ovlivnění údajů v jejím okolí.

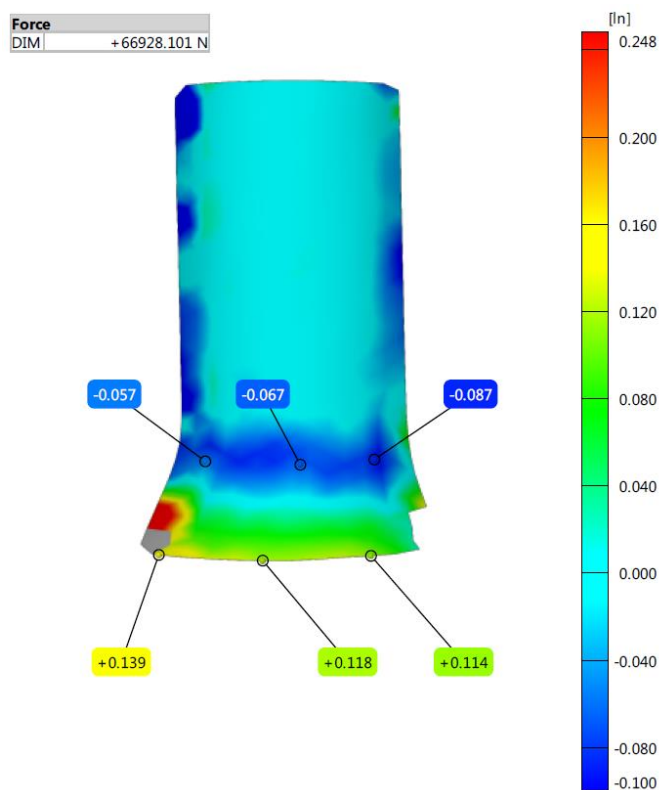
Obvodové logaritmické přetvoření je znázorněno na obrázku 46a. Maximální hodnota se nachází v místech největšího rozšíření sledované oblasti (pokud není brána v úvahu ovlivněná oblast). Na obrázku 46b je znázorněn průběh radiálního přetvoření, jehož nejvyšší hodnoty se nachází v kuželové oblasti zkušební vzorku.



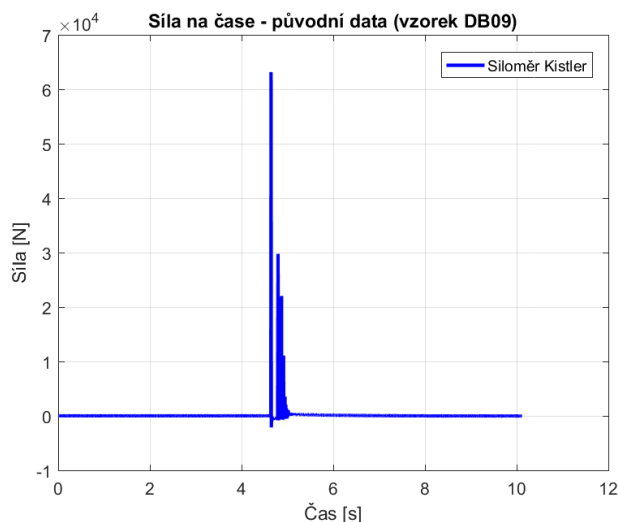
Obr. 46 Přetvoření v okamžiku dosažení maximální síly (DB9)

Třetí vizualizace se týká logaritmického přetvoření v normálovém směru (viz obr. 47). Výsledek je bohužel také lokálně ovlivněn zakrytím patternu v průběhu snímání experimentu (šedá oblast). Z obrázku 47 lze získat informace, že před samotným rozšiřováním konce trubky proběhlo nepatrné zvětšení tloušťky stěny (oblast ohybu) a následné tvarování konce doprovázené ztenčením stěny.

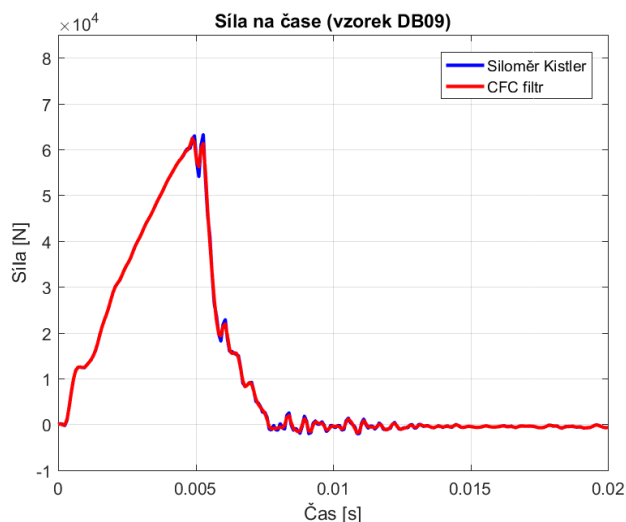
Záznam rozšiřování zkušební vzorku DB9 byl získán také pomocí dynamometru. Výstupem tohoto zařízení byla závislost průběhu síly na čase. Obrázek 48a znázorňuje nefiltrovaný záznam, který bylo nutné dále zpracovat. Jakmile jsou odstraněny nedůležité údaje, vznikne nefiltrovaný graf, který byl dále zpracován v programu MATLAB a vyhlazen pomocí CFC filtru. Srovnání původního nefiltrovaného průběhu s vyhlazeným průběhem síly je znázorněna na obrázku 48b.



Obr. 47 Přetvoření v normálovém směru v okamžiku dosažení maximální síly (DB9)



a)



b)

Obr. 48 Záznamy získané pomocí dynamometru (DB9)

### 4.3 Popis simulace a získané výsledky [14], [21], [23], [26], [41], [42]

Další odstavce jsou věnovány popisu přípravy simulace, která se má svým průběhem a výsledky přiblížit uskutečněnému experimentu. Pro tvorbu byl zvolen program ANSYS. Jedná se o multifyzikální program a jeho součástí je řada výpočetních modulů, které je možné využít pro simulaci kvazistatických, termomechanických, hydraulických a dalších problémů. Pro simulaci rozšiřování trubek za dynamických podmínek je vhodné využít modul Explicit Dynamics.

Nejprve je důležité správné nastavení materiálového modelu. V případě problémů, kde je předpokládán výskyt vyšších rychlostí deformace, je vhodné volit například výpočet dle Johnson-Cooka, nebo obdobné modely, které jsou schopny popsat napětí a přetvoření za dynamických podmínek.

Materiál experimentální trubky byl 17 240. Pro simulaci je zvolen materiálový model dle Johnson-Cooka. Jednotlivé konstanty tohoto modelu jsou převzaty z dizertační práce [23]. Simulace s těmito konstantami vykazuje nejlepší shody s experimentem. Jiné dostupné modely nevykazovaly dostatečnou úroveň přesnosti. Konstanty použité pro simulaci rozšiřování trubek za biaxiálního stavu napjatosti jsou uvedeny v tabulce 7.

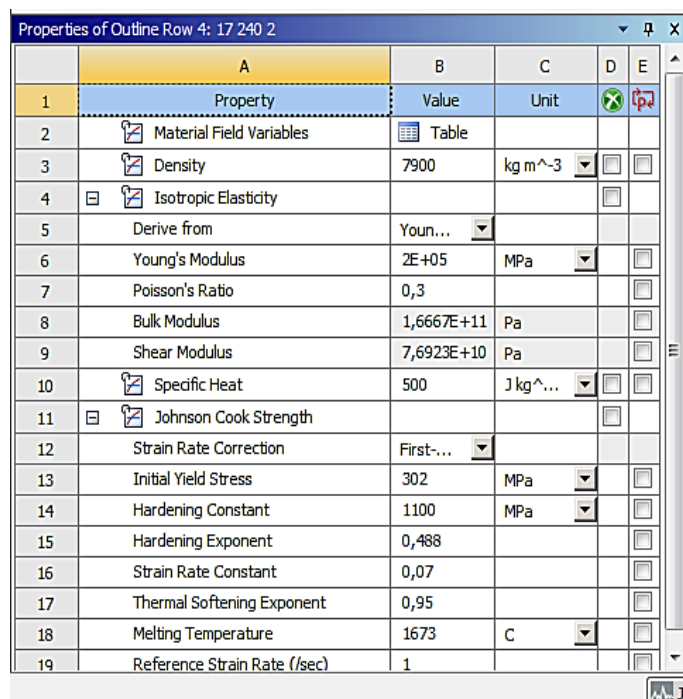
Tab. 7 Konstanty pro materiálový model dle Johnson-Cooka. [23]

Mez kluzu	$\sigma_0$	[MPa]	302
Modul zpevnění	B	[MPa]	1100
Koeficient citlivosti na rychlost deformace	C	[-]	0,07
Exponent deformačního zpevnění	n	[-]	0,488
Referenční rychlost deformace	$\dot{\phi}_0$	[s <sup>-1</sup> ]	1
Exponent citlivosti na rychlost deformace	m	[-]	0,95

Jednotlivé konstanty jsou dosazeny do daných polí v prostředí Engineering Data (obrázek 49).

Podoba geometrického modelu (obrázek 50) vychází z výkresů, které byly součástí diplomové práce [26], na kterou tato práce navazuje.

Při tvorbě byla uskutečněna určitá zjednodušení. Bylo využito rotační symetrie problému. Celá soustava je řešena jako 2D s využitím axisymetrie. Beran je zjednodušen na válcové těleso, které svou hmotností a objemem odpovídá původnímu beranu. Poloha beranu je nastavena tak, aby simulace začínala v podstatě okamžikem nárazu beranu na trubku. Zarážka byla taktéž zjednodušena, protože její tvar



Properties of Outline Row 4: 17 240 2				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7900	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Youn...		
6	Young's Modulus	2E+05	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Specific Heat	500	J kg <sup>-1</sup> ...	
11	Johnson Cook Strength			
12	Strain Rate Correction	First...		
13	Initial Yield Stress	302	MPa	
14	Hardening Constant	1100	MPa	
15	Hardening Exponent	0,488		
16	Strain Rate Constant	0,07		
17	Thermal Softening Exponent	0,95		
18	Melting Temperature	1673	C	
19	Reference Strain Rate (/sec)	1		

Obr. 49 Nastavení materiálového modelu

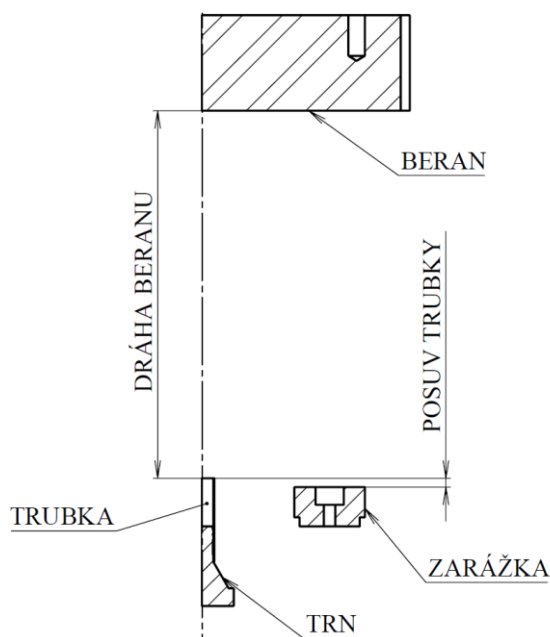


neovlivní výsledek. Z důvodu nanášení nerovnoměrné a silné vrstvy maziva je upravena vzdálenost mezi čelem trubky a zarážkou na 15,5 mm místo původních 15 mm. Díky geometrickým zjednodušením mohlo dojít k diskretizaci, která nevykazovala takovou časovou náročnost, jaká by byla potřebná na výpočet 3D modelů.

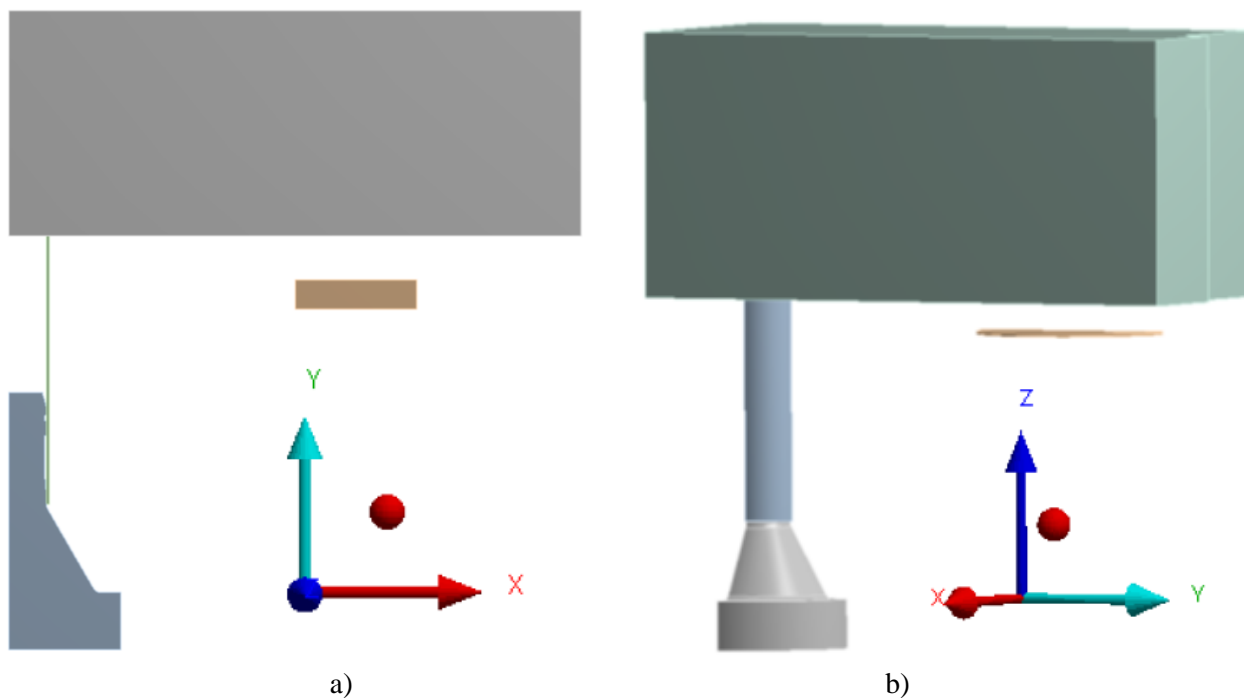
Pro srovnání je na obrázku 51a zobrazen geometrický model, který je využíván pro výpočty zjednodušené na případ 2D. Na obrázku 51b je znázorněn původní geometrický model, který odpovídal jedné čtvrtině experimentální soustavy. Beran byl vytvořen dle původní geometrie bez zjednodušení.

Problém nastal ale během diskretizace, kdy se počet elementů pohyboval řádově v desítkách tisíc. Taková hodnota vede k prodloužení výpočtových časů. Řádově v desítkách hodin, popř. v jednotkách dnů. Vzhledem k časové náročnosti bylo učiněno již uvedené zjednodušení, a to převod celého problému do plochy. Tímto se značně snížil počet prvků, který nyní nepřekročí hodnotu deseti tisíc. Také klesl čas výpočtů, který se pohybuje řádově v jednotkách hodin.

V poslední řadě je nutné nastavit chování jednotlivých součástí. Z nabídky je vybrána možnost Flexible, která zaručí deformovatelnost všech objektů v soustavě.



Obr. 50 Geometrie simulace [26]

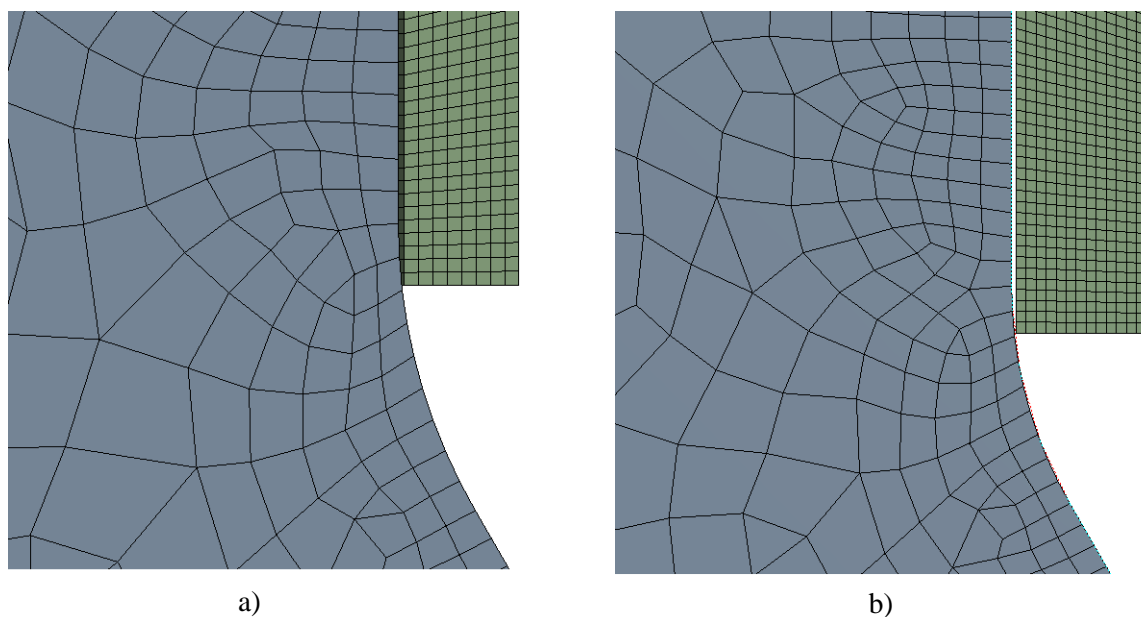


Obr. 51 Geometrické modely

Jakmile je zvolen materiálový model a vytvořen geometrický model, který vhodně popisuje geometrii a geometrické vazby daného problému, přichází na řadu diskretizace celé soustavy.

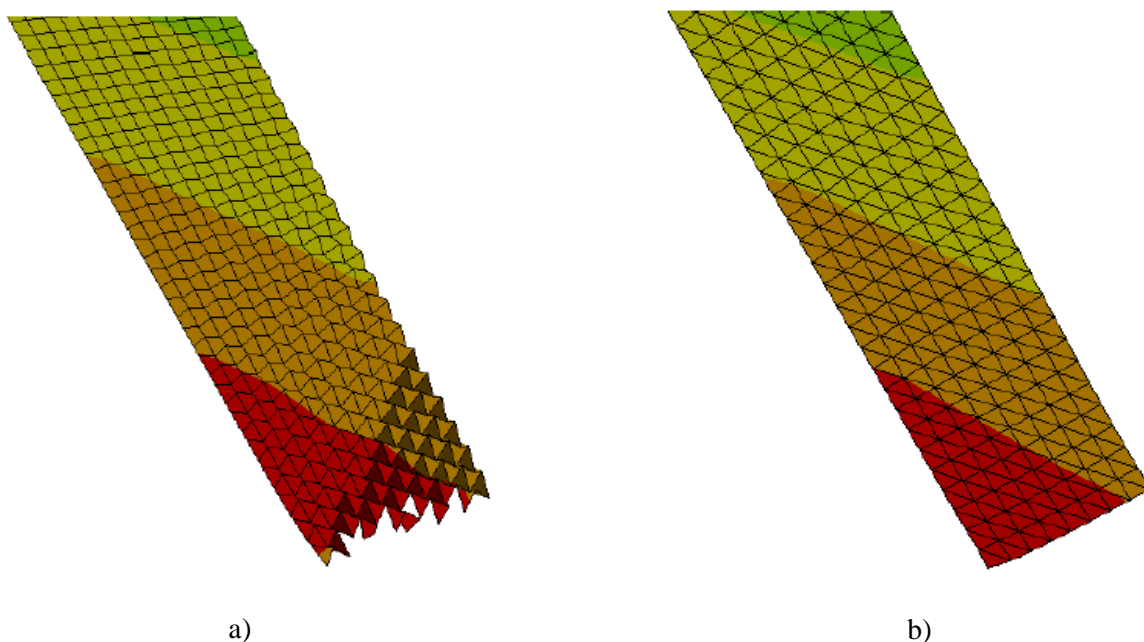
Dochází k vytvoření sítě z konečného počtu prvků. Tato síť je tvořena s ohledem na kontaktní plochy a geometrii daného problému. Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1, čím má síť

vyšší hustotu, tím jsou výsledky získané simulací přesnější. Nevýhodou je nárůst výpočetního času. Z těchto důvodů je síť vytvořena takovým způsobem, že velká hustota prvků je aplikována po celé ploše průřezu trubky. Co se týká beranu a trnu, je použit příkaz Edge Sizing. Tímto je docíleno zjemnění sítě na povrchu daného tělesa se zachováním hrubozrné sítě uvnitř. Z toho vyplývá vyšší přesnost výsledků a kontaktních poměrů při relativně malém časovém prodloužení simulace. Toto nastavení je zřejmé z obrázku 52a, který zachycuje vzorek DA8 s beranem a z obrázku 52b, kde je zachycena zkušební trubka DB9 s beranem.



Obr. 52 Geometrie po diskretizaci

Mimo hustoty sítě má vliv na průběh simulace a výsledek také tvar použitých elementů. Původní nastavení zahrnovalo síť s čtyřúhelníkovými prvky. V případě vzorku DA8 s touto sítí není problém a výpočtem jsou získány přijatelné výsledky. Při simulaci rozšiřování vzorků DB9 ale docházelo ke „zborcení“ sítě. Došlo k tzv. Hourglass efektu (viz obr. 53a).



Obr. 53 Model trubky po ukončení simulace



Jedná se o efekt, který je nefyzikálního charakteru, má nulovou energii. Dochází ke změně tvaru sítě a tím může dojít k ovlivnění průběhu napětí a přetvoření v dané oblasti. Některé tvary elementů jsou náchylné na vznik tohoto efektu. Mezi ně se řadí i použité čtyřúhelníkové prvky. Existují ale elementy, které nejsou náchylné na vznik tohoto efektu. Těmito prvky jsou například trojúhelníky, popř. čtyřštěny.

Aby se předešlo vzniku Hourglass efektu, je možné využít jednu z následujících metod:

- zjemnění sítě v určitých oblastech, to ale vede k prodloužení výpočetních časů,
- rozložení zatížení na více elementů, toto řešení ale nemusí být jednoduché, nebo praktické,
- změna tvaru elementu sítě,
- využití algoritmů pro kontrolu Hourglass efektu.

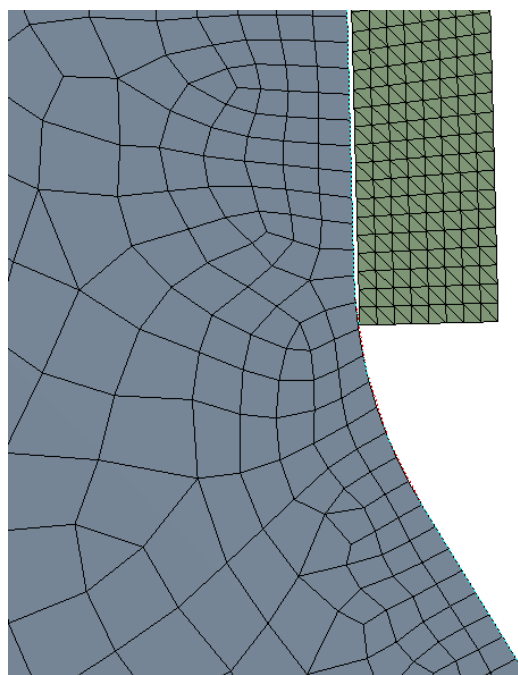
Pro eliminaci Hourglass efektu je zvolena změna typu sítě (obr. 53b). Původní čtyřúhelníková síť je nahrazena sítí s trojúhelníkovými elementy. Součástí této změny bylo také nutné nastavit novou velikost elementu z důvodu výpočetního času. Původní velikost elementu byla 0,12 mm. Nová velikost je nastavena na 0,2 mm. Tato změna samozřejmě vede k nevýrazné změně přesnosti výsledných hodnot. Důležité ale je, že došlo k odstranění Hourglass efektu. Geometrie se sítí trojúhelníkových prvků aplikovaných pro trubku je na obrázku 54.

Jelikož se jedná o problém, kde vystupuje také tření v kontaktních plochách, je nezbytné jeho hodnotu zahrnout do simulace. Původní předpoklad statického koeficientu tření se pohyboval mezi hodnotami 0,1 až 0,15. Dynamické tření bylo zprvu zvoleno ve výši 0,05. Na základě provedených simulací byly tyto hodnoty upřesněny. Pravděpodobná hodnota statického koeficientu tření je 0,12. Hodnota dynamického koeficientu tření se pohybuje okolo 0,07. Tyto hodnoty figurovaly v simulacích, jejichž výsledky jsou dále použity k porovnávání průběhů sil získaných experimentálními metodami.

Nezanedbatelnou veličinou při dynamických simulacích je rychlost pohyblivých objektů. V případě experimentu byl pohyblivý pouze beran. Jeho rychlost v momentě dopadu dosahovala hodnoty  $3,962 \text{ m.s}^{-2}$ . Mimo samotnou rychlost je nastaveno také gravitační zrychlení a jeho směr.

Jestliže dochází k simulaci dějů, které probíhají za vyšších teplot, popř. nižších teplot, je vhodné danou hodnotu teploty zanést do nastavení. Základní nastavení počítá s teplotou  $22^\circ\text{C}$ . Daný experiment probíhal za teploty nepatrně nižší, proto je hodnota teploty v simulaci nastavena na  $18^\circ\text{C}$ .

V rámci pre-processingu je také nezbytné nastavit délku pozorovaného časového úseku. Při nevhodném nastavení může dojít k zbytečně dlouhým výpočetním časům, kdy jsou počítány údaje, které již nemají vliv na pozorované veličiny, nebo může dojít k situaci, kdy je výpočet úspěšně dokončen před důležitým zkoumaným okamžikem. S ohledem na uvedené skutečnosti je délka simulace vzorku DA8 nastavena na hodnotu 0,005 s a doba simulace pro vzorek DB9 je nastaven na hodnotu 0,006 s.



Obr. 54 Geometrie po diskretizaci – trojúhelníková síť

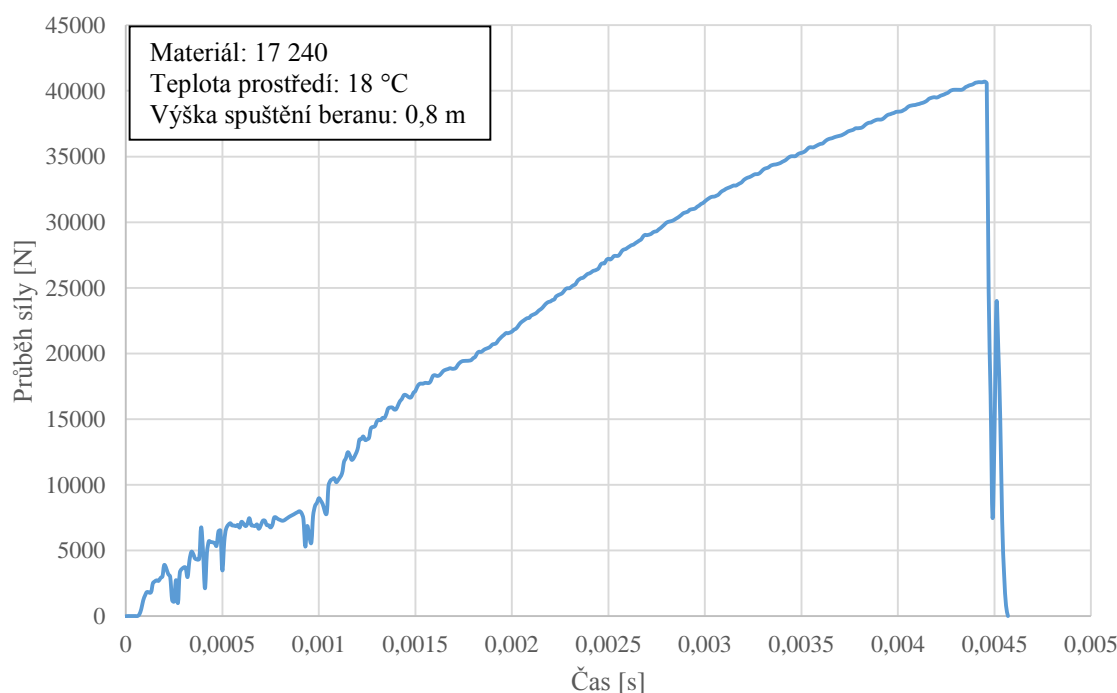
Tabulka 8 obsahuje informace o nastavení jednotlivých vzorků a rozdílech v počtu elementů, délce simulovaného úseku a výpočetních časů.

Tab. 8 Přehled základních údajů vyskytujících se v rámci simulace.

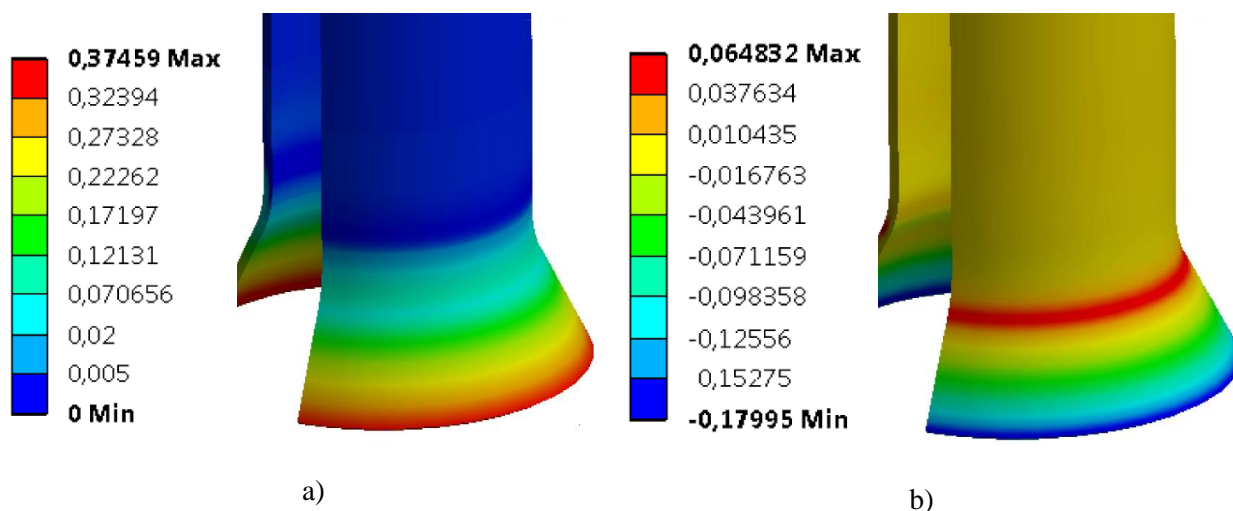
	DA8	DB9 (simulace s efektem Hourglass)	DB9 (simulace bez efektu Hourglass)
Typ prvku	čtyřúhelníky	čtyřúhelníky	trojúhelníky
Velikost prvku [mm]	0,12	0,12	0,2
Počet uzlů	9 775	13 099	6 932
Počet elementů	8 832	12 173	9 600
Simulovaný časový úsek [s]	0,005	0,006	0,006
Výpočetní čas	cca 6 hodin	cca 13 hodin	cca 8 hodin

Po provedených výpočtech přichází na řadu post-processing. V rámci této etapy jsou zpracovány výsledky. Cílem simulací je vytvořit závislost síly na čase, která svým průběhem co nejvěrněji popisuje závislosti získané pomocí provedených experimentů. Nejprve jsou uvedeny výsledky simulace pro vzorek DA8.

Na obrázku 55 je vykreslen průběh závislosti síly na čase. Proces rozšiřování v tomto případě trvá přibližně 0,0045 s. Poté dochází k vibracím celé soustavy a jejímu uklidnění. Důležitá je maximální síla, která dosahuje hodnoty 40 704 N. Tento údaj je mezi hodnotami získanými dynamometrem KISTLER a vysokorychlostními kamerami.



Obr. 55 Průběh síly v závislosti na čase – vzorek DA8 (simulace)

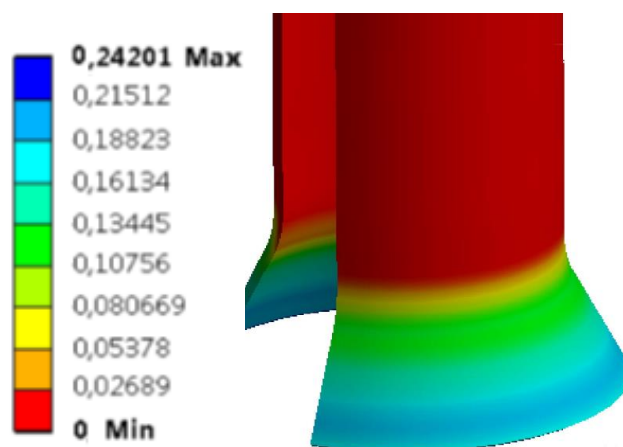


Obr. 56 Vizualizace přetvoření pomocí simulace (DA8)

Z výsledků simulace jsou dále získány vizualizace průběhů jednotlivých přetvoření. Na obrázku 56a je vykresleno obvodové logaritmické přetvoření. Nejvyšší hodnota se nachází v místě, kde vzorek dosáhl největšího rozšíření.

Obrázek 56b zachycuje radiální logaritmické přetvoření v momentu působení největší síly.

Normálové logaritmické přetvoření je znázorněno na obrázku 57. Zde je nutné doplnit informaci, že skutečný vzorek nejprve vykazoval nepatrné zvětšení tloušťky stěny v místě ohybu a poté docházelo k rozšiřování konce trubky doprovázené ztenčováním stěny. U simulace je tento průběh v podstatě bez zvětšování tloušťky stěny a je zaznamenán pouze průběh ztenčování.



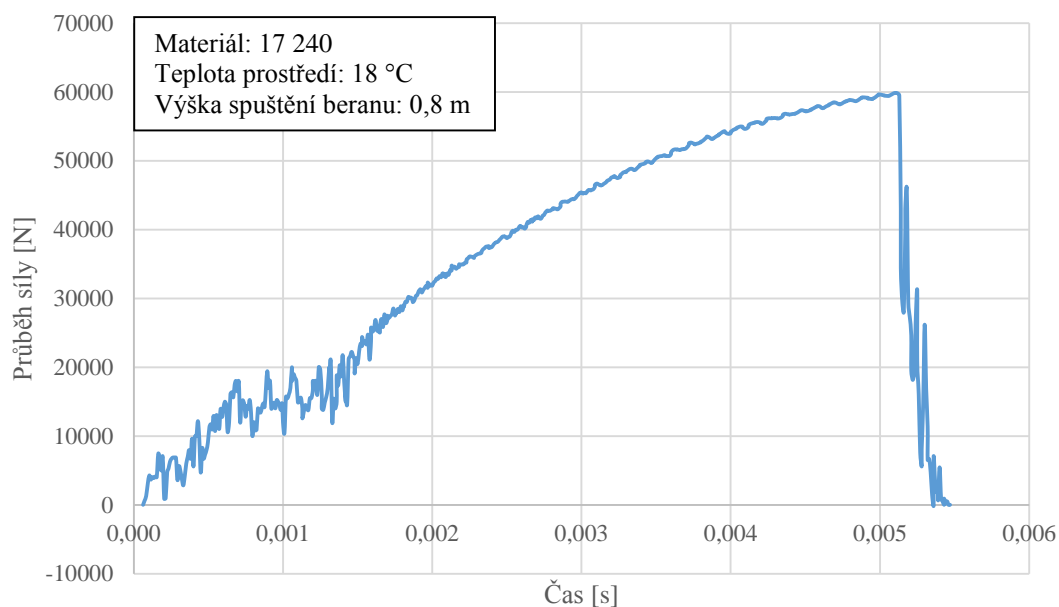
Obr. 57 Vizualizace normálového přetvoření pomocí simulace (DA8)

Další uvedené výsledky se týkají vzorku DB9 s trojúhelníkovou mřížkou. Na obrázku 58 je znázorněn průběh síly v závislosti na čase. Doba celého rozšíření trvala přibližně 0,0055 s. maximální síla dle simulace má hodnotu 59 861 N. Ve srovnání s hodnotami maximální síly zjištěnými experimentálně pomocí dynamometru a systému ARAMIS, je hodnota získaná simulací nižší.

Mimo průběh síly je možné z výsledků simulace vykreslit také průběhy jednotlivých logaritmických přetvoření. Tyto jsou znázorněny na obrázku 59 a 60.

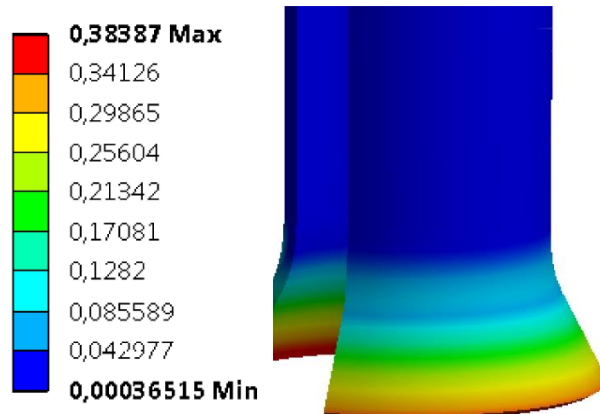
Průběh obvodového přetvoření v okamžiku dosažení maximální síly je vykreslen na obrázku 59. Maximální hodnota přetvoření se nachází opět v místě největšího rozšíření vzorku.

Na obrázku 60a se nachází vizualizace průběhu radiálního přetvoření v okamžiku dosažení maximální síly. Stejně jako u vzorku DA8 dochází k maximálnímu přetvoření v místě největšího rozšíření.

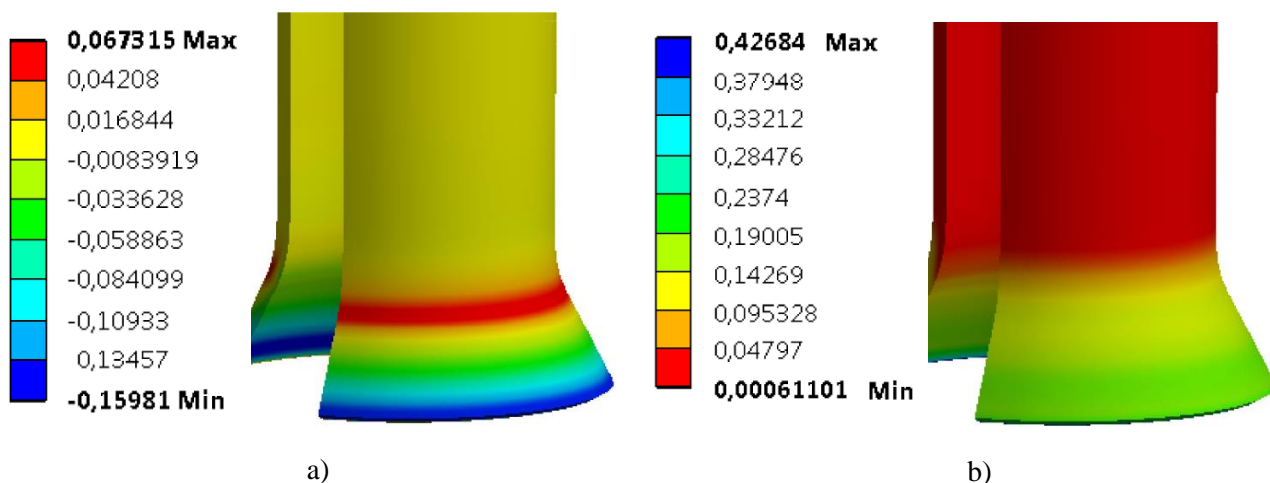


Obr. 58 Průběh síly v závislosti na čase – vzorek DB9 (simulace)

Průběh normálového přetvoření je znázorněn na obrázku 60b. Od ohybu směrem k největšímu rozšíření dochází ke zmenšování tloušťky stěny. Oproti reálnému procesu zde opět chybí malý nárůst tloušťky stěny v místě ohybu.



Obr. 59 Vizualizace obvodového přetvoření pomocí simulace (DB9)



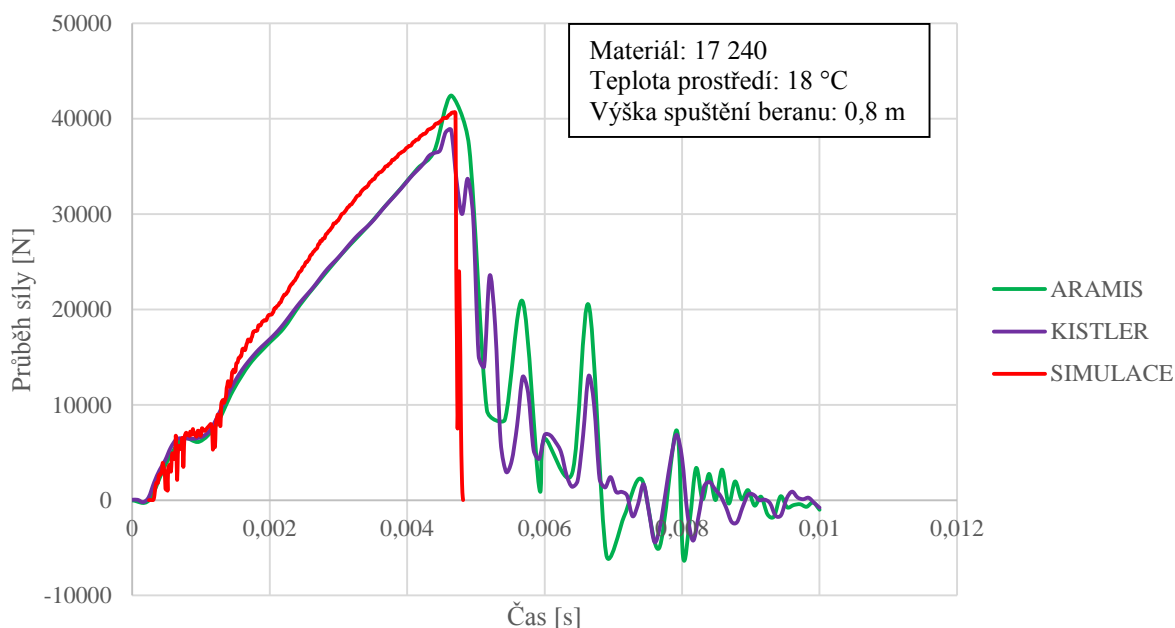
Obr. 60 Vizualizace přetvoření pomocí simulace (DB9)

#### 4.4 Srovnání experimentálních a simulačních výsledků

Jakmile jsou známy výsledky ze simulace, je možné je dále zpracovávat a využívat pro porovnávání zkoumaných veličin získaných experimentální cestou, nebo jinou výpočetní metodou.

Výsledky získané experimentálně a simulací jsou již uvedeny v předchozích podkapitolách a následující odstavce budou věnovány jejich porovnání. Nejprve jsou zobrazeny hodnoty pro vzorek DA8.

Průběhy sil získaných systémem ARAMIS, dynamometrem KISTLER a simulací jsou uvedeny v obrázku 61.

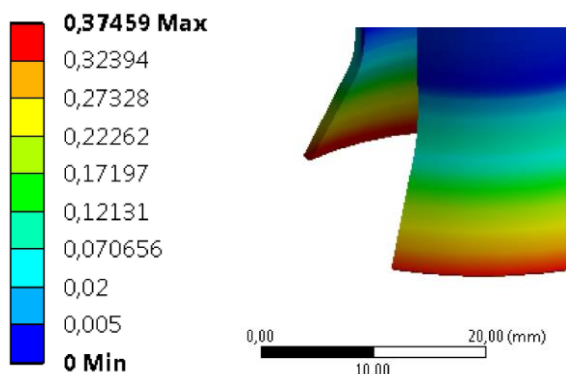


Obr. 61 Graf závislosti síly na čase – srovnání jednotlivých metod (DA8)

Hodnotu nejvyšší síly vykazuje systém ARAMIS, a to ve výši 42 440 N. Nejnižší hodnoty naopak vykazuje dynamometr KISTLER (38 821 N). Maximální síla určená simulací má hodnotu 40 704 N. Z porovnání vyplývá, že odchylka simulace oproti systému ARAMIS je 4,1 % a oproti dynamometru je tato odchylka 4,9 %. Na základě uvedených dat je možné tyto výsledky simulace považovat za technicky přijatelné.

Mimo sílu je vhodné srovnat také průběhy logaritmického přetvoření získané simulací a zpracováním záznamu z vysokorychlostních kamer. Pořadí porovnávání jednotlivých logaritmických přetvoření je následující:

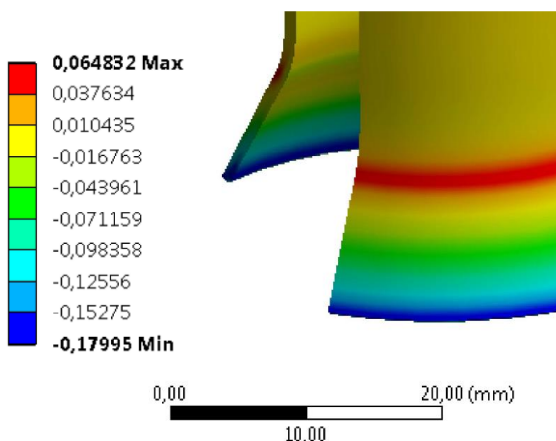
- obvodové přetvoření,
- radiální přetvoření,
- normálové přetvoření.



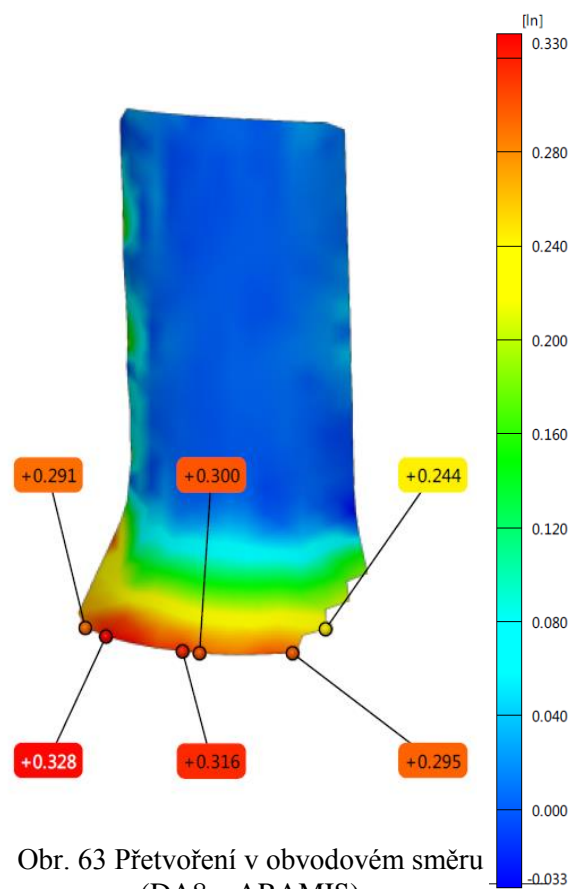
Obr. 62 Přetvoření v obvodovém směru (DA8 - simulace)

Jak je zřejmé z obrázku 62, podle simulace nabývá obvodové přetvoření nejvyšší hodnoty na okraji trubky. Hodnota se pohybuje okolo 0,37. Při srovnání s obrázkem 63 (vyhodnocení na základě údajů ze systému ARAMIS) se tyto hodnoty výrazně neliší. Je nutné brát ohled na to, že vykreslené plochy z údajů získaných systémem ARAMIS nesahají až po okraj trubky (z důvodů popsaných v podkapitole 4.1).

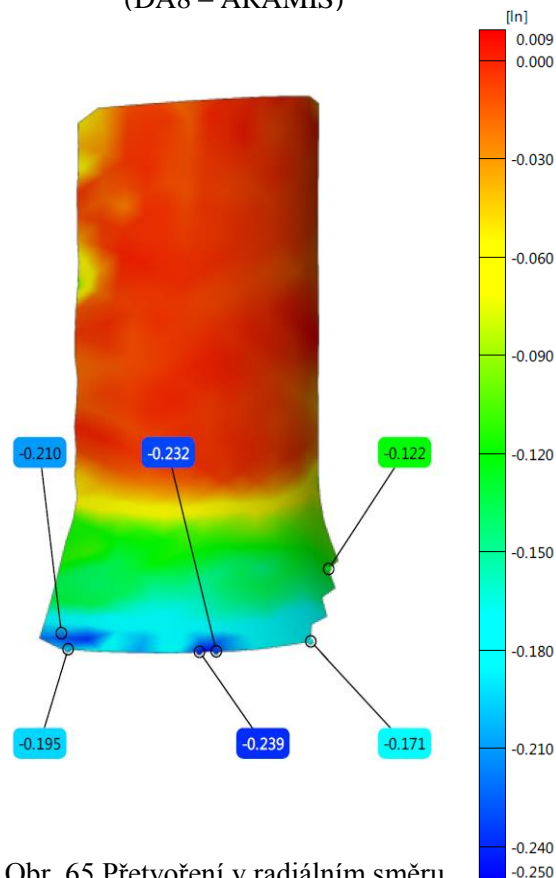
Další vyhodnocení se týká přetvoření v radiálním směru. U tohoto druhu přetvoření již dochází k menším odchylkám mezi simulačním výpočtem (obr. 64) a vyhodnocením na základě snímků z vysokorychlostních kamer (obr. 65). Maximální hodnota u simulačního výpočtu se pohybuje kolem -0,18, kdežto dle přepočtu ze záznamu vysokorychlostních kamer tato hodnota dosahuje až -0,25. Vzhledem k výskytu a nerovnoměrnosti hodnoty -0,25 může být rozdíl způsoben nevhodným natočením patternu v daný okamžik.



Obr. 64 Přetvoření v radiálním směru (DA8 - simulace)

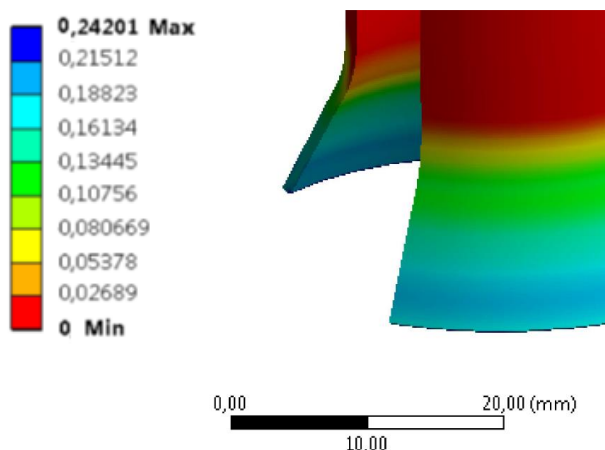


Obr. 63 Přetvoření v obvodovém směru (DA8 - ARAMIS)



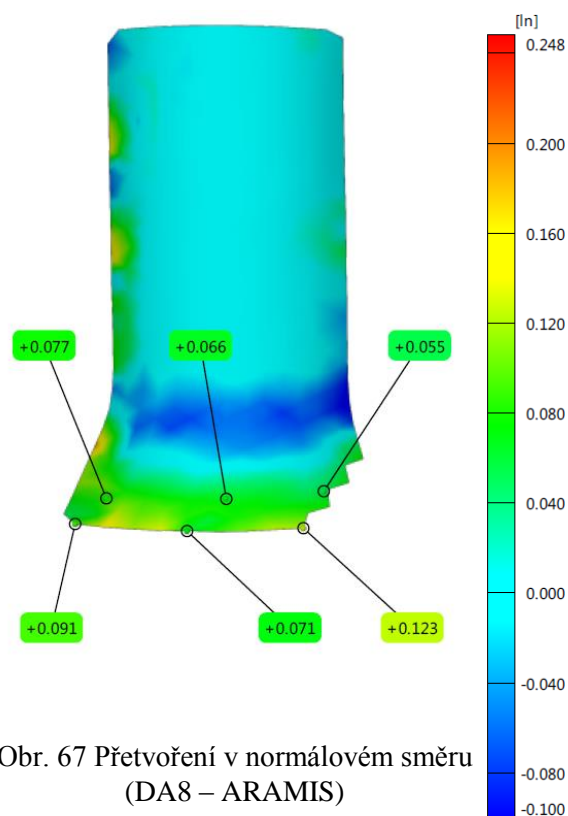
Obr. 65 Přetvoření v radiálním směru (DA8 - ARAMIS)





Obr. 66 Přetvoření v normálovém směru  
(DA8 – simulace)

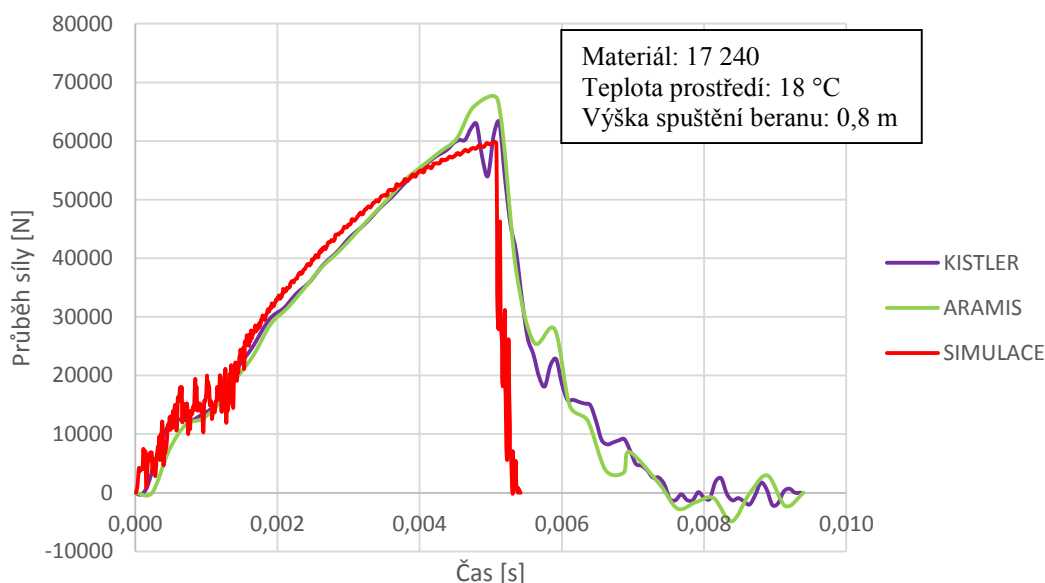
Srovnání normálového přetvoření ukazuje rozdíly mezi výsledky ze simulace (obr. 66) a z hodnot získaných systémem ARAMIS (obr. 67). Toto je způsobeno absencí fáze stlačení během simulace. Reálný vzorek vykazoval malé rozšíření tloušťky stěny v důsledku napěchování o malou hodnotu a poté došlo k rozšiřování konce trubky a ztenčování stěny. V rámci simulace proběhlo pouze ztenčování stěny vzorku. Maximální hodnoty jsou, s minimální odchylkou, téměř totožné.



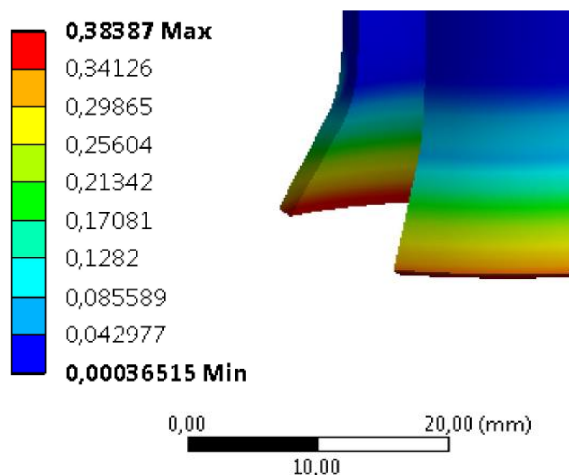
Obr. 67 Přetvoření v normálovém směru  
(DA8 – ARAMIS)

Dalším sledovaným vzorkem je zkušební trubka s označením DB9. Průběh síly v závislosti na čase a porovnání jednotlivých metod získání tohoto průběhu je uvedena na obrázku 68.

Simulací byla zjištěna maximální síla, která dosahuje hodnoty 59 861 N. Při porovnání s maximální silou zjištěnou pomocí dynamometru (63 168 N) je vypočítaná odchylka mezi těmito údaji v hodnotě 5,4 %. Druhým porovnávacím údajem byla maximální síla zjištěná pomocí systému ARAMIS (66 928 N). Vypočítaná odchylka dosahovala hodnoty 10,6 %. Vzhledem k uvedeným odchylkám je možné konstatovat, že výsledek simulace je na hranici technické přijatelnosti.



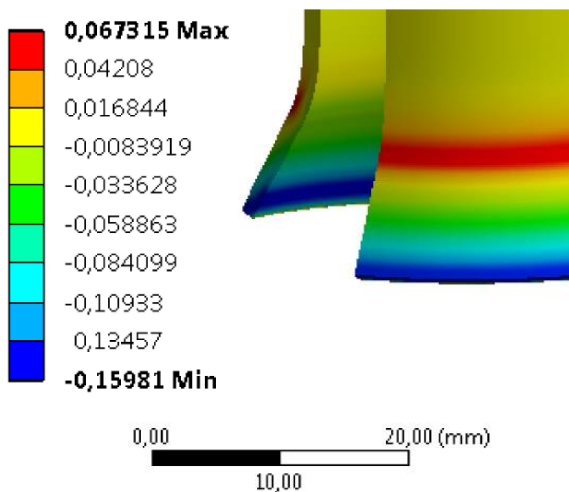
Obr. 68 Graf závislosti síly na čase – srovnání jednotlivých metod (DB9)



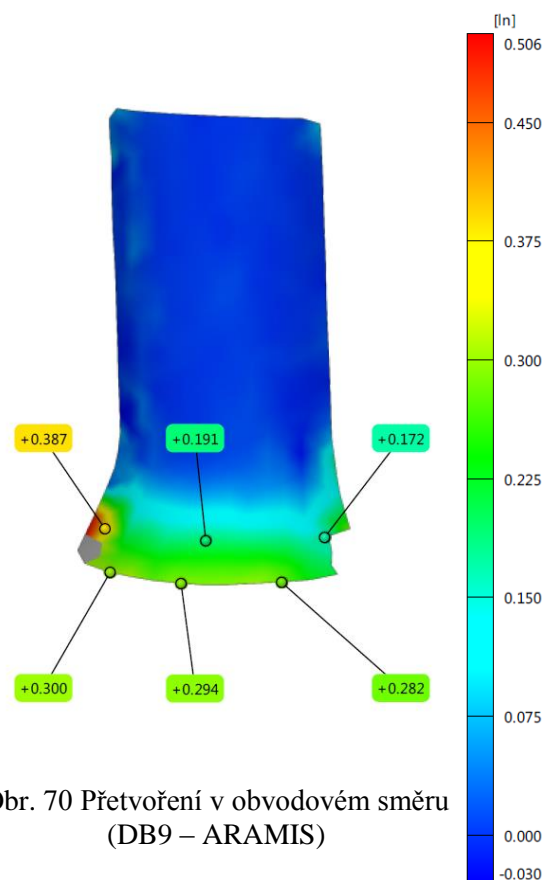
Obr. 69 Přetvoření v obvodovém směru (DB9 – simulace)

Hodnoty obvodového přetvoření se dle předpokladů zvyšují směrem k hranám trubky (viz obr. 69 a obr 70). Zatímco simulace vykresluje isoplochy rovnoměrně, během experimentu došlo k ovlivnění patternu a určité oblasti se nevykreslily (obr. , šedá oblast), popřípadě došlo k ovlivnění hodnot v okolí této oblasti. Z porovnání vyplývá, že se výsledky získané simulací výrazně neliší od průběhů přetvoření získaných pomocí systému ARAMIS (mimo ovlivněnou oblast).

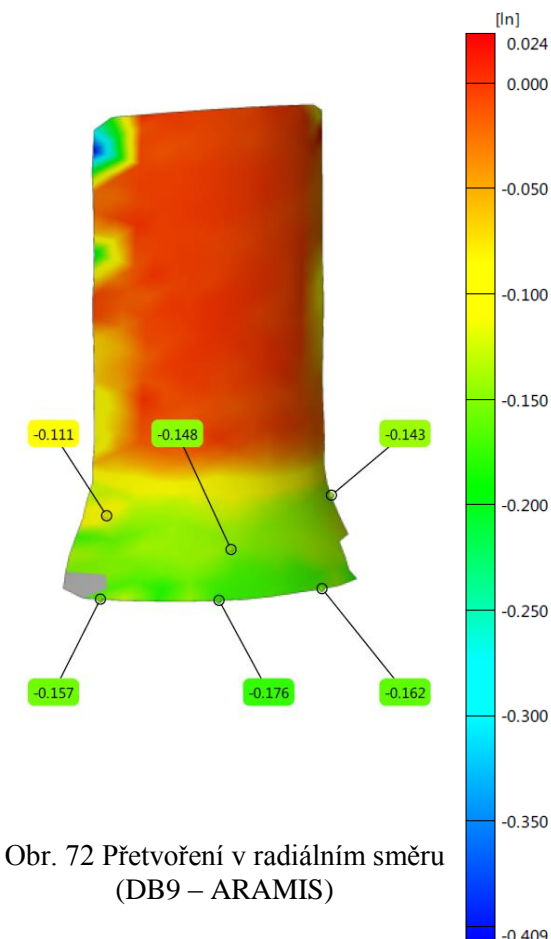
Při srovnání průběhu přetvoření v radiálním směru získaného simulací a pomocí vysokorychlostních kamer lze zaznamenat určité odchylky v hodnotách. Krajní hodnoty si s malými odchylkami odpovídají, ale rozdíl hodnot nepatrně narůstá se vzdáleností od okraje trubky.



Obr. 71 Přetvoření v radiálním směru (DB9 – simulace)

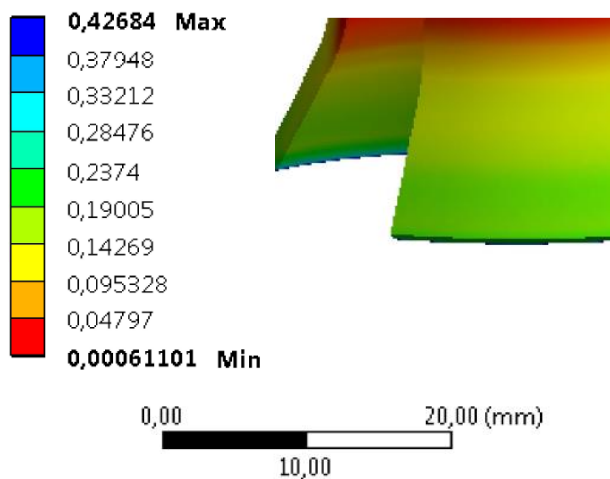


Obr. 70 Přetvoření v obvodovém směru (DB9 – ARAMIS)



Obr. 72 Přetvoření v radiálním směru (DB9 – ARAMIS)

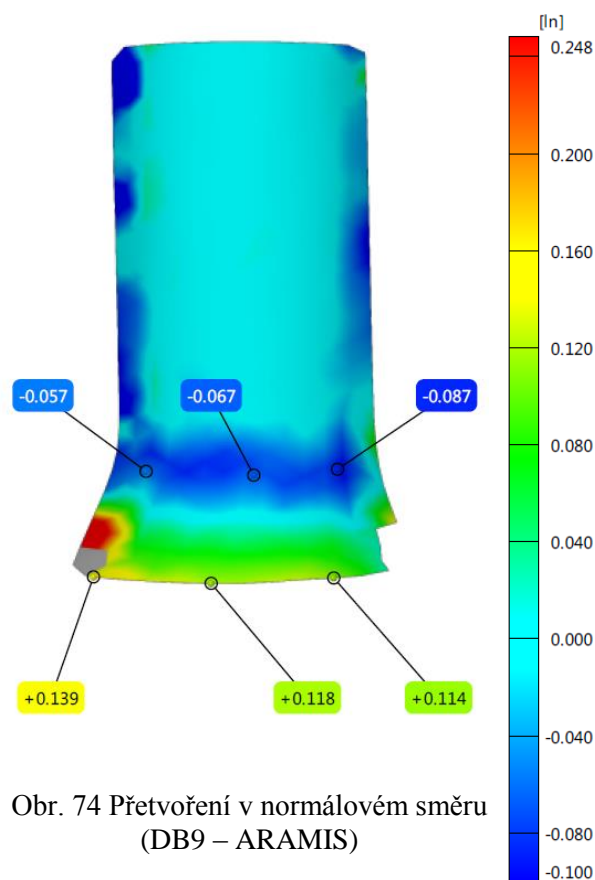




Obr. 73 Přetvoření v normálovém směru  
(DB9 – simulace)

Z porovnání výsledných vizualizací normálového logaritického přetvoření ze simulace (obr. 73) a z údajů získaných vysokorychlostními kamerami (obr. 74) lze zjistit určité odchylky. Výstup ze simulace postrádá fázi nepatrného předpěchování vzorku před samotným rozšiřováním pomocí trnu (absence záporných hodnot přetvoření). Dále je patrný rozdíl v hodnotách přetvoření.

Z obrázku 74 je ale patrné, že vizualizovaná oblast vzorku byla ovlivněna mazivem (šedá plocha v levé dolní části). Dalším vysvětlením odchylek může být také to, že z údajů pořízených vysokorychlostní kamerou, byla zpracována oblast, která přesně nenavazuje na hranu trubky (je od hrany odsazena o několik milimetrů z důvodu zamezení ovlivnění výsledků mazivem).



Obr. 74 Přetvoření v normálovém směru  
(DB9 – ARAMIS)

## ZÁVĚRY

Na základě experimentu FSI-S-14-2394 byla vytvořena simulace, která popisuje průběh rozšiřování trubek za dynamických podmínek. Zkušební aparaturou byl padostroj s nepohyblivým trnem. Za účelem tvorby simulace byly zvoleny vzorky DA8 a DB9. Výstupem je porovnání síly v závislosti na čase získané pomocí vysokorychlostních kamer systému ARAMIS, dynamometru KISTLER 9107A a simulace v programu ANSYS Workbench.

Počáteční podmínky byly zvoleny dle průběhu experimentu. Na základě simulace byl určen koeficient statického a dynamického tření. Původní předpoklad koeficientu pro statické tření byl rozsah hodnot 0,1 – 0,15. Na základě provedených simulací vykazovala přijatelné výsledky hodnota koeficientu 0,12. Původní předpoklad hodnoty dynamického koeficientu tření byl 0,05. Na základě simulací se nejlépe osvědčil koeficient o velikosti 0,07.

Pro vzorek DA8 maximální síla zjištěná simulací nabývá hodnoty 40 704 N. Ve srovnání s výsledky z dynamometru KISTLER (38 821 N) a systémem ARAMIS (42 440 N) jsou v rozptylu méně než 10 %.

Pro vzorek DB9 maximální síla zjištěná simulací nabývá hodnoty 59 861 N. Ve srovnání s výsledky z dynamometru KISTLER (63 168 N) je odchylka těchto hodnot přibližně 5 %. Ve srovnání se systémem ARAMIS (66 928 N) je tato odchylka necelých 11%. Vzhledem k tomu, že síla byla vypočítávána ze systému ARAMIS nepřímo, je možné tento výsledek považovat za technicky přijatelný.

Simulaci lze doporučit pro vzorky, které byly plně dolisovány a nevykazovaly trhliny. Dále je nutné uvést, že koeficienty tření výše uvedené jsou sice ověřeny simulací, ale je nutné brát ohled na nerovnoměrnost vrstvy maziva, která vznikla během jeho nanášení a také pohyb samotného maziva během rozšiřování.

Pro prasklé trubky je vhodné vytvořit nové simulace, kde by se uvažovala kritéria porušení materiálu. Pro nové simulace je nezbytné vytvořit sofistikovanější modely.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [5]

1. 1-Component Force Sensor, Fz up to 400 kN / 89.9 klbf. In: *Kistler - Measuring Systems and Sensors* [online]. Czech Republic: Kistler Eastern Europe, c2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: [https://www.kistler.com/cz/en/products/components/force-sensors/#1\\_\\_component\\_\\_force\\_\\_sensor\\_\\_fz\\_up\\_to\\_400\\_k\\_n\\_89\\_9\\_klbf\\_9071\\_a](https://www.kistler.com/cz/en/products/components/force-sensors/#1__component__force__sensor__fz_up_to_400_k_n_89_9_klbf_9071_a)
2. LOGAN, Daryl L. *A first course in the finite element method*. 4th ed. United States: Thomson, 2007. ISBN 978-0-534-55298-6.
3. ANSYS Mechanical Products Brochure. *ANSYS* [online]. USA: ANSYS, c2011 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/-/media/Ansys/corporate/resourcelibrary/brochure/ansys-mechanical-suite-brochure.pdf>
4. *ASM Aerospace Specification Metals Inc.: ASM Material Data Sheet* [online]. Florida: ASM Aerospace Specification Metals, 2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304A>
5. *CITACE PRO: Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
6. Cost versus model size in using the explicit and implicit methods. In: *Getting Started with ABAQUS/Explicit: Keywords Version: 3.5 Comparison of explicit and implicit procedures* [online]. United States of America: ABAQUS, c2006 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/gsx/default.htm?startat=ch03s05.html>
7. Deformace a odpevňovací pochody: Plastická deformace a deformační zpevnění. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, FSI VUT v Brně, c2012 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr>
8. Deformation measurer gom ARAMIS 4M. *UseScience* [online]. Latvia [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://scientificservices.eu/item/deformation-measurer-gom-aramis-4m/486>
9. PETERKOVA, Eva a Radko SAMEK. DETERMINATION OF DEFORMATION RESISTANCE IN TUBE FLARING PROCESS. *MM Science Journal* [online]. 2016, **2016**(05), 1332-1337 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.17973/MMSJ.2016\_11\_2016115. ISSN 18031269. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/november-2016.html#2016115>
10. *European Steel and Alloy Grades/Numbers* [online]. Ukraine, c2011-2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=100](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=100)

11. ŠTĚTINA, Josef, Michal JAROŠ a Pavel RAMÍK. *Experimentální metody - Virtuální laboratoř: 3. Fyzikální principy snímačů* [online]. Brno, 2003 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-05.htm>. E-learning. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
12. Explicit Dynamics By Using Ansys. In: *CPDLR* [online]. India: CPDLR, c2015 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.cpdlr.com/notes-articles-engineering/239-explicit-dynamics-by-using-ansys.html>
13. Finite Element Analysis. In: *NELflow measurement services* [online]. United Kingdom [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: [http://www.tuvnel.com/site2/subpage/software\\_solutions\\_finite\\_element\\_analysis](http://www.tuvnel.com/site2/subpage/software_solutions_finite_element_analysis)
14. Hourglass. *LS-DYNA Support* [online]. USA, Germany, Sweden: LSTC and DYNAmore, c2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.dynasupport.com/howtos/element/hourglass>
15. KIM, Nam-Ho. *Introduction to nonlinear finite element analysis*. USA: Springer Science + Business Media New York, c2015. ISBN 9781441917454.
16. Load Washer: 0 . 20 kN until 0 .. 700 kN. *Kistler CAD-Download Service - kistler.com* [online]. Switzerland: Kistler Group, c2009 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [https://kistler-embedded.partcommunity.com/3d-cad-models/FileService/File/kistler/02\\_force/01\\_single\\_component\\_force\\_sensors\\_compression/01\\_sensors/9101a\\_9107a\\_english.pdf/](https://kistler-embedded.partcommunity.com/3d-cad-models/FileService/File/kistler/02_force/01_single_component_force_sensors_compression/01_sensors/9101a_9107a_english.pdf/)
17. Materiálové normy. *Ferona, a.s. - Velkoobchod hutním materiálem: E-železná kniha* [online]. Česká Republika: Ferona, c2004-2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: [http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)
18. MIELNIK, Edward M. *Metalworking science and engineering*. New York: McGraw-Hill, c1991. ISBN 0070419043.
19. FUSEK, Martin a Radim HALAMA. *MKP a MHP* [online]. 2011 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://mi21.vsb.cz/modul/metoda-konecných-prvku-metoda-hranicních-prvku>. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni.
20. PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011.pdf>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
21. Multiphysics. *ANSYS* [online]. USA: ANSYS, c2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/products/multiphysics>

22. LUKS, Tomáš. *Okrajové podmínky ve válcovací mezeře při válcování za tepla a za studena* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=132642](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=132642). Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.
23. DOHNAL, Ivo. *Ověření možnosti využití tahové deformace při Hopkinsonově testu*. Brno, 2014. Disertace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc.
24. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie: část tváření* [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm>. Syllabus. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
25. DROZDA, Jiří. *Příručka ANSYS Workbench*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 9788001051757.
26. ŠREFL, Martin. *Rozšiřování konce trubky za statických a dynamických podmínek*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková PhD.
27. ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie I*. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. ISBN 80-214-0128-1.
28. SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření část I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 9788021442207.
29. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření část II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4406-5.
30. Stanovení přirozeného přetvárného odporu trubek za podmínek biaxiálního stavu napjatosti. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno: VUT v Brně, c2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/veda-a-vyzkum/resene-projekty/detail/25063#popis>
31. ŠLAIS, Miroslav. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvaritelnost Ti slitin*. Brno, 2012. Disertace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Forejt, CSc.
32. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447479.
33. STOROŽEV, Michail Vasil'jevič a Jevgenij Aleksandrovič POPOV. *Teória tvárnenia kovov*. Bratislava: Alfa, 1978. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa).

34. FOREJT, Milan, Jan KREJČÍ a Jaroslav BUCHAR. *Teorie a technologie tváření vysokými deformačními rychlostmi: Vybrané statě z tváření*. Brno, 1994. Sylaby přednášek. Vysoké učení technické v Brně, Ústav fyziky materiálů Akademie věd České republiky.
35. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 8021423749.
36. MADENCI, Erdogan. a Ibrahim. GUVEN. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. New York: Springer, c2006. ISBN 0387282890.
37. WILSON, Frank. Tube Bending Principals. In: *AWC Industries: AWC Industries Blog* [online]. 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://www.awcindustries.com/tube-bending-principals/>
38. Tube End Forming Machines. In: *Motico for Industry & Trade* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.motico-lb.com/category/17/Pipe-amp-Tube-Benders#prettyPhoto>
39. PETERKOVA, Eva a Milan SREFL. USE OF 3D MEASURING SYSTEM ARAMIS FOR ANALYSIS OF TUBE FLARING PROCESS. *MM Science Journal* [online]. 2016, **2016**(05), 1392-1397 [cit. 2017-05-25]. DOI: 10.17973/MMSJ.2016\_11\_2016129. ISSN 18031269. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/november-2016.html#2016129>
40. PETRUŽELKA, Jiří a Jiří HRUBÝ. *Výpočetní metody ve tváření*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 8070787287.
41. HALE, Steven. Why Worry About Hourglassing in Explicit Dynamics? Part I. In: *CAE Associates: Engineering Advantage Blog* [online]. Middlebury: CAE Associates, c2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://caeai.com/blog/why-worry-about-hourglassing-explicit-dynamics-part-i>
42. HALE, Steven. Why Worry About Hourglassing in Explicit Dynamics? Part II. In: *CAE Associates* [online]. Middlebury: CAE Associates, c2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://caeai.com/blog/why-worry-about-hourglassing-explicit-dynamics-part-ii>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
B	Modul zpevnění	[MPa]
C	Koeficient citlivosti na rychlost deformace	[-]
<b>C</b>	Matice tlumení	
D <sub>0</sub>	Průměr vzorku před deformací	[mm]
$\bar{D}$	Modul deformačního zpevnění	[MPa]
e	Eulerovo číslo	[-]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
F	Síla	[N]
<b>F</b>	Matice zatížení	
g	Gravitační zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
<b>G</b>	Matice definující odpovídající dvojice deformačních parametrů	
h	Charakteristický rozměr nejmenšího prvku sítě	[m]
h	Vzdálenost plochy beranu od čela trubky	[m]
h <sub>m</sub>	Tloušťka vrstvy maziva	[mm]
H <sub>0</sub>	Výška vzorku před deformací	[mm]
K	Koeficient napětí	[MPa]
<b>K</b>	Matice tuhosti	
k <sub>p</sub>	Tuhost kontaktu	[N.mm <sup>-1</sup> ]
m	Hmotnost beranu	[kg]
m	Teplotní koeficient odpevnění	[-]
m	Třecí faktor	[-]
<b>M</b>	Matice hmotnosti	
n	Exponent deformačního zpevnění	[-]
r	Vnější poloměr trubky	[-]
r <sub>m</sub>	Poloměr ohybu trubky	[mm]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R <sub>r</sub>	Poloměr	[mm]
r <sub>s</sub>	Střední poloměr trubky	[mm]
r <sub>s</sub>	Vážený průměr součinitelů anizotropie	[-]
R <sub>v</sub>	Střední poloměr v nejširším místě rozšíření	[mm]
R <sub>x</sub>	Obecný poloměr	[mm]
r <sub>α</sub>	Součinitel plastické anizotropie	[-]
R <sub>Θ</sub>	Poloměr	[mm]
s <sub>0</sub>	Tloušťka stěny vzorku	[mm]
S <sub>1</sub>	Plocha elementu	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>2</sub>	Plocha elementu	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>3</sub>	Plocha elementu	[mm <sup>2</sup> ]
s <sub>v</sub>	Minimální tloušťka stěny	[mm]
s <sub>x</sub>	Tloušťka trubky v obecném bodě	[mm]
T	Pracovní teplota	[K]
T <sub>0</sub>	Referenční teplota	[K]
T <sub>m</sub>	Teplota tavení	[K]
T*	Homologická teplota	[K]
<b>U</b>	Matice posuvů	
<b>Ů</b>	Matice rychlostí	
<b>Ů</b>	Matice zrychlení	
dα	Úhel elementu	[°]
β	Úhel opásání	[rad]

$\delta$	Vzdálenost kontaktu	[mm]
$\delta_0$	Matice počátečních kontaktních mezer	
$\Delta r$	Součinitel plošné anizotropie	[-]
$\Delta t$	Časový krok	[s]
$\Delta t_c$	Kritická délka časového kroku	[s]
$d\varepsilon_n$	Přírůstek deformace v normálovém směru	[-]
$d\varepsilon_r$	Přírůstek deformace v radiálním směru	[-]
$d\varepsilon_\Theta$	Přírůstek deformace v obvodovém směru	[-]
$\varepsilon_c$	Celkové poměrné přetvoření	[-]
$\varepsilon_{el}$	Elastická poměrná deformace	[-]
$\varepsilon_m$	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti	[-]
$\varepsilon_{pl}$	Plastická poměrná deformace	[-]
$\varepsilon_\Theta$	Přetvoření v obvodovém směru	[-]
$(\varepsilon_\Theta)_{\max}$	Maximální hodnota deformace	[-]
$\eta$	Dynamická viskozita	[N.s.m <sup>-2</sup> ]
$d\vartheta$	Úhel elementu	[°]
$d\Theta$	Úhel elementu	[°]
$\nu$	Poissonova konstanta	[-]
$\mu$	Koeficient tření	[-]
$\rho$	Hustota materiálu	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	Napětí	[MPa]
$\sigma_0$	Mez kluzu	[MPa]
$\sigma_1$	Hlavní napětí	[MPa]
$\sigma_2$	Hlavní napětí	[MPa]
$\sigma_3$	Hlavní napětí	[MPa]
$(\sigma_d)_T$	Celková hodnota deformačního odporu	[MPa]
$\sigma_{ef}$	Efektivní napětí	[MPa]
$\sigma_f$	Napětí způsobené třením	[MPa]
$\sigma_k$	Napětí na mezi kluzu	[MPa]
$\sigma_{ke}$	Aproximovaná mez kluzu	[MPa]
$\sigma_{\max}$	Maximální hodnota napětí	[MPa]
$\sigma_{\min}$	Minimální hodnota napětí	[MPa]
$\sigma_n$	Normálové napětí	[MPa]
$\sigma_o$	Ohybové napětí	[MPa]
$(\sigma_o)_I$	Napětí vztahující se k ohybu	[MPa]
$(\sigma_o)_{II}$	Napětí vztahující se k napřimování	[MPa]
$\sigma_r$	Radiální napětí	[MPa]
$(\sigma_r)$	Maximální hodnota radiálního napětí	[MPa]
$\bar{\sigma}$	Střední hodnota napětí	[MPa]
$(\bar{\sigma})'$	První aproximační hodnota napětí	[MPa]
$(\bar{\sigma})''$	Druhá aproximační hodnota napětí	[MPa]
$(\bar{\sigma})_{\text{mid}}$	Střední hodnota meze kluzu	[MPa]
$\tau$	Smykové napětí	[MPa]
$\tau_{ad}$	Třecí napětí - adhezní	[MPa]
$\tau_{koh}$	Třecí napětí - kohezní	[MPa]
$\tau_{\max}$	Maximální hodnota smykového napětí	[MPa]
$\varphi_b$	Přetvoření ve směru	[-]
$\varphi_t$	Přetvoření ve směru tloušťky	[-]
$\dot{\varphi}$	Rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varphi}_0$	Referenční rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ukázka dílů z turbek a simulace v programu ANSYS [25], [37], [38] .....	9
Obr. 2 Zkušební vzorek .....	10
Obr. 3 Metody rozšiřování konců trubek [27], [29] .....	11
Obr. 4 Přípravek pro rozšiřování konců trubek [29] .....	11
Obr. 5 Rozválnovací trn [32] .....	12
Obr. 6 Detail fází procesu rozšiřování [9] .....	13
Obr. 7 Napěťově-deformační stav při rozšiřování trubek [9] .....	14
Obr. 8 Geometrie obecného elementu [9] .....	15
Obr. 9 Rozložení ohybového napětí [9] .....	17
Obr. 10 Obecný průběh křivek napětí/deformace [34] .....	19
Obr. 11 Průběh napětí v závislosti na rychlosti deformace [18] .....	19
Obr. 12 Mechanismy plastické deformace [7] .....	20
Obr. 13 Obecná závislost koeficientu tření na rychlosti nástroje [34] .....	20
Obr. 14 Defekty rozšířených konců trubek [29] .....	21
Obr. 15 Kritické hodnoty $k_r$ [29] .....	22
Obr. 16 Odběr vzorků pro zjištění anizotropie [18] .....	22
Obr. 17 Liletův diagram [32] .....	23
Obr. 18 Možné tvary elementů sítě konečných prvků [36] .....	25
Obr. 19 Závislost přesnosti řešení na hustotě sítě [24] .....	25
Obr. 20 Ukázka aplikace sítě konečných prvků .....	26
Obr. 21 Obecné porovnání časové náročnosti explicitních a implicitních algoritmů [6] .....	28
Obr. 22 Typy kontaktů [15] .....	29
Obr. 23 Pokutový přístup [19] .....	30
Obr. 24 Striebeckův diagram [22] .....	31
Obr. 25 Zákon odpružení po trvalé změně tvaru [35] .....	32
Obr. 26 Podmínky plasticity v Haighově prostoru [35] .....	33
Obr. 27 Izotropní zpěvňování [19] .....	33
Obr. 28 Kinematické zpěvňování [19] .....	34
Obr. 29 Simulace proudění v potrubí [13] .....	34
Obr. 30 Simulace crashtestu [12] .....	35
Obr. 31 Geometrie tvářecího trnu [26] .....	36
Obr. 32 Zkušební vzorky před nanesením patternu .....	36
Obr. 33 Model zkušební aparatury .....	37
Obr. 34 Měřicí systém ARAMIS [8] .....	38
Obr. 35 Experimentální aparatura před provedením měření .....	38
Obr. 36 Dynamometr KISTLER [1] .....	38
Obr. 37 Vzorek DA1 s trhlinou .....	39
Obr. 38 Vzorky DA8 a DB9 po deformaci .....	39
Obr. 39 Vzorek DA8 během deformace .....	40
Obr. 40 Průběh síly v závislosti na čase – vzorek DA8 (ARAMIS) .....	41
Obr. 41 Přetvoření v okamžiku dosažení maximální síly (DA8) .....	41
Obr. 42 Přetvoření v normálovém směru v okamžiku dosažení maximální síly (DA8) .....	42
Obr. 43 Záznamy získané pomocí dynamometru (DA8) .....	42
Obr. 44 Vzorek DB9 během deformace .....	43
Obr. 45 Průběh síly v závislosti na čase – vzorek DB9 (ARAMIS) .....	44
Obr. 46 Přetvoření v okamžiku dosažení maximální síly (DB9) .....	44
Obr. 47 Přetvoření v normálovém směru v okamžiku dosažení maximální síly (DB9) .....	45
Obr. 48 Záznamy získané pomocí dynamometru (DB9) .....	45

Obr. 49 Nastavení materiálového modelu .....	46
Obr. 50 Geometrie simulace [26] .....	47
Obr. 51 Geometrické modely.....	47
Obr. 52 Geometrie po diskretizaci .....	48
Obr. 53 Model trubky po ukončení simulace .....	48
Obr. 54 Geometrie po diskretizaci – trojúhelníková síť .....	49
Obr. 55 Průběh síly v závislosti na čase – vzorek DA8 (simulace).....	50
Obr. 56 Vizualizace přetvoření pomocí simulace (DA8) .....	51
Obr. 57 Vizualizace normálového přetvoření pomocí simulace (DA8) .....	51
Obr. 58 Průběh síly v závislosti na čase – vzorek DB9 (simulace) .....	52
Obr. 59 Vizualizace obvodového přetvoření pomocí simulace (DB9).....	52
Obr. 60 Vizualizace přetvoření pomocí simulace (DB9) .....	52
Obr. 61 Graf závislosti síly na čase – srovnání jednotlivých metod (DA8) .....	53
Obr. 62 Přetvoření v obvodovém směru (DA8 – simulace) .....	54
Obr. 63 Přetvoření v obvodovém směru (DA8 – ARAMIS).....	54
Obr. 64 Přetvoření v radiálním směru (DA8 – simulace).....	54
Obr. 65 Přetvoření v radiálním směru (DA8 – ARAMIS) .....	54
Obr. 66 Přetvoření v normálovém směru (DA8 – simulace).....	55
Obr. 67 Přetvoření v normálovém směru (DA8 – ARAMIS).....	55
Obr. 68 Graf závislosti síly na čase – srovnání jednotlivých metod (DB9) .....	55
Obr. 69 Přetvoření v obvodovém směru (DB9 – simulace) .....	56
Obr. 70 Přetvoření v obvodovém směru (DB9 – ARAMIS) .....	56
Obr. 71 Přetvoření v radiálním směru (DB9 – simulace).....	56
Obr. 72 Přetvoření v radiálním směru (DB9 – ARAMIS).....	56
Obr. 73 Přetvoření v normálovém směru (DB9 – simulace) .....	57
Obr. 74 Přetvoření v normálovém směru (DB9 – ARAMIS).....	57

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Ekvivalenty oceli 17 240 [10] .....	10
Tab. 2 Chemické složení oceli 17 240 .....	10
Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli 17 240 [26] .....	10
Tab. 4 Porovnání explicitní a implicitní metody řešení [20] .....	28
Tab. 5 Údaje uvedené výrobcem dynamometru Kistler [16] .....	39
Tab. 6 Údaje týkající se simulovaných vzorků .....	40
Tab. 7 Konstanty pro materiálový model dle Johnson-Cooka [23] .....	46
Tab. 8 Přehled základních údajů vyskytujících se v rámci simulace .....	50

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Hodnoty ARAMIS DA8
Příloha 2	Hodnoty KISTLER DA8
Příloha 3	Hodnoty SIMULACE DA8
Příloha 4	Hodnoty ARAMIS DB9
Příloha 5	Hodnoty KISTLER DB9
Příloha 6	Hodnoty SIMULACE DB9

## PŘÍLOHA 1 – Hodnoty ARAMIS DA8

Čas pro srovnání [s]	Čas [s]	Síla [N]	Čas pro srovnání [s]	Čas [s]	Síla [N]
0	0	-27,4658	0,0064	26	2807,617
0,000244	1	-6,10352	0,00664	27	20489,5
0,000488	2	3778,076	0,006896	28	-5667,11
0,000733	3	6442,261	0,007152	29	-1773,07
0,000977	4	6134,033	0,007408	30	2212,524
0,001221	5	7885,742	0,007664	31	-5053,71
0,001465	6	11483,76	0,00792	32	7330,322
0,001709	7	14279,17	0,008015	33	-5969,24
0,001954	8	16210,94	0,008109	34	-2288,82
0,002198	9	17980,96	0,008204	35	3366,089
0,002442	10	20495,61	0,008298	36	85,44922
0,002686	11	22698,97	0,008393	37	2761,841
0,002931	12	24826,05	0,008487	38	9,155273
0,003175	13	26818,85	0,008582	39	3204,346
0,003419	14	28662,11	0,008676	40	-344,849
0,003663	15	30709,84	0,008771	41	1965,332
0,003907	16	32690,43	0,008865	42	106,8115
0,004152	17	34783,94	0,00896	43	1052,856
0,004396	18	36630,25	0,009055	44	-570,679
0,00464	19	42440,8	0,009149	45	360,1074
0,00464	20	37170,41	0,009244	46	-1495,36
0,00464	21	9457,397	0,009338	47	-1715,09
0,00464	22	8401,489	0,009433	48	405,8838
0,00568	23	20855,71	0,009527	49	-750,732
0,00568	24	1358,032	0,009622	50	-515,747
0,006	25	6442,261	0,009716	51	-424,194
			0,009811	52	-695,801
			0,009905	53	-231,934
			0,01	54	-1004,03

## PŘÍLOHA 2 – Hodnoty KISTLER DA8

% Time	Silomer_700kN	% Time	Silomer_700kN	% Time	Silomer_700kN
0	44,68645	0,00344	28832,79	0,00664	13015,75
0,00008	37,71101	0,00352	29440,09	0,00672	9996,687
0,00016	-209,045	0,0036	30135,67	0,0068	2232,797
0,00024	306,2657	0,00368	30823,84	0,00688	1332,092
0,00032	1874,433	0,00376	31463,19	0,00696	2419,39
0,0004	3176,008	0,00384	32093,81	0,00704	870,8409
0,00048	4187,883	0,00392	32748,85	0,00712	872,8027
0,00056	5502,537	0,004	33431,57	0,0072	482,3957
0,00064	6357,247	0,00408	34105,14	0,00728	-1689,15
0,00072	6503,731	0,00416	34680,18	0,00736	-418,309
0,0008	6463,623	0,00424	35315,16	0,00744	1671,055
0,00088	6437,465	0,00432	36125,4	0,00752	-1344,3
0,00096	6527,928	0,0044	36423,82	0,0076	-4400,85
0,00104	6739,589	0,00448	36700,44	0,00768	-2689,91
0,00112	7230,05	0,00456	38579,67	0,00776	806,318
0,0012	8167,158	0,00464	38821,85	0,00784	4462,978
0,00128	9361,267	0,00472	33473,64	0,00792	6858,39
0,00136	10611,4	0,0048	30008,15	0,008	4370,335
0,00144	11769,32	0,00488	33714,51	0,00808	-1541,36
0,00152	12782,72	0,00496	29735,24	0,00816	-4243,69
0,0016	13683,21	0,00504	15164,18	0,00824	-1670,84
0,00168	14449,64	0,00512	14010,4	0,00832	1432,364
0,00176	15144,78	0,0052	23523,6	0,0084	1906,041
0,00184	15784,56	0,00528	18341,06	0,00848	1139,396
0,00192	16335,62	0,00536	6157,139	0,00856	432,6956
0,002	16874,69	0,00544	2964,129	0,00864	-772,749
0,00208	17451,26	0,00552	4085,65	0,00872	-2266,8
0,00216	18092,13	0,0056	7833,862	0,0088	-2298,85
0,00224	18819,97	0,00568	12913,73	0,00888	-743,975
0,00232	19589,89	0,00576	11267,09	0,00896	577,0002
0,0024	20351,52	0,00584	5251,639	0,00904	566,755
0,00248	21055,38	0,00592	4330,008	0,00912	7,411412
0,00256	21702,36	0,006	6829,834	0,0092	56,89348
0,00264	22383,34	0,00608	6815,229	0,00928	-322,396
0,00272	23144,53	0,00616	6081,281	0,00936	-1635,52
0,0028	23907,91	0,00624	5015,564	0,00944	-1575,36
0,00288	24568,83	0,00632	2607,727	0,00952	141,4708
0,00296	25155,86	0,0064	1403,155	0,0096	893,947
0,00304	25789,53	0,00648	2035,304	0,00968	286,4293
0,00312	26479,45	0,00656	6793,867	0,00976	96,34835
0,0032	27153,67			0,00984	255,9117
0,00328	27773,61			0,00992	-273,786
0,00336	28314,86			0,01	-789,969

### PŘÍLOHA 3 – Hodnoty SIMULACE DA8 (1/4)

Čas pro srovnání [s]	Čas [s]	Síla [N]	Čas pro srovnání [s]	Čas [s]	Síla [N]	Čas pro srovnání [s]	Čas [s]	Síla [N]
0,000244	0	0	0,001794	0,00155	17767	0,003424	0,00318	32952
0,000254	0,00001	12,483	0,001814	0,00157	17758	0,003434	0,00319	33033
0,000264	0,00002	12,483	0,001824	0,00158	17915	0,003444	0,0032	33193
0,000274	0,00003	12,483	0,001834	0,00159	18274	0,003454	0,00321	33304
0,000294	0,00005	12,483	0,001844	0,0016	18355	0,003464	0,00322	33382
0,000304	0,00006	12,483	0,001854	0,00161	18304	0,003474	0,00323	33432
0,000314	0,00007	135,02	0,001864	0,00162	18309	0,003484	0,00324	33499
0,000324	0,00008	543,56	0,001874	0,00163	18415	0,003494	0,00325	33587
0,000334	0,00009	1200	0,001884	0,00164	18592	0,003504	0,00326	33655
0,000344	0,0001	1589,1	0,001894	0,00165	18726	0,003514	0,00327	33658
0,000354	0,00011	1844,8	0,001914	0,00167	18825	0,003524	0,00328	33702
0,000374	0,00013	1813,9	0,001924	0,00168	18885	0,003534	0,00329	33824
0,000384	0,00014	2500	0,001934	0,00169	18838	0,003544	0,0033	33975
0,000394	0,00015	2646,9	0,001944	0,0017	18845	0,003554	0,00331	34077
0,000404	0,00016	2732,7	0,001954	0,00171	18897	0,003564	0,00332	34122
0,000414	0,00017	2688	0,001964	0,00172	19129	0,003574	0,00333	34180
0,000424	0,00018	2915,2	0,001974	0,00173	19296	0,003584	0,00334	34294
0,000434	0,00019	3038,1	0,001984	0,00174	19398	0,003594	0,00335	34354
0,000444	0,0002	3914	0,001994	0,00175	19437	0,003604	0,00336	34388
0,000464	0,00022	3200	0,002014	0,00177	19448	0,003614	0,00337	34407
0,000474	0,00023	2992,2	0,002024	0,00178	19465	0,003634	0,00339	34502
0,000484	0,00024	1232,8	0,002034	0,00179	19505	0,003644	0,0034	34591
0,000494	0,00025	1119,7	0,002044	0,0018	19657	0,003654	0,00341	34663
0,000504	0,00026	2750,1	0,002054	0,00181	19742	0,003664	0,00342	34750
0,000514	0,00027	992,26	0,002064	0,00182	20020	0,003674	0,00343	34882
0,000524	0,00028	3335,1	0,002074	0,00183	20136	0,003684	0,00344	34983
0,000544	0,0003	3714,9	0,002084	0,00184	20121	0,003694	0,00345	35024
0,000554	0,00031	3686,7	0,002094	0,00185	20218	0,003704	0,00346	35023
0,000564	0,00032	2983,9	0,002104	0,00186	20328	0,003714	0,00347	35034
0,000574	0,00033	4274,7	0,002124	0,00188	20443	0,003724	0,00348	35159
0,000584	0,00034	4904,8	0,002134	0,00189	20551	0,003734	0,00349	35241
0,000594	0,00035	4716,1	0,002144	0,0019	20697	0,003744	0,0035	35279
0,000604	0,00036	4372	0,002154	0,00191	20727	0,003754	0,00351	35330
0,000624	0,00038	4369,1	0,002164	0,00192	20801	0,003764	0,00352	35416
0,000634	0,00039	6766,3	0,002174	0,00193	21015	0,003774	0,00353	35562
0,000644	0,0004	4967,2	0,002184	0,00194	21167	0,003784	0,00354	35686
0,000654	0,00041	2122,5	0,002194	0,00195	21314	0,003794	0,00355	35709
0,000664	0,00042	4799,9	0,002204	0,00196	21433	0,003804	0,00356	35693
0,000674	0,00043	5704,8	0,002214	0,00197	21562	0,003814	0,00357	35758
0,000684	0,00044	5649,5	0,002224	0,00198	21546	0,003824	0,00358	35837
0,000704	0,00046	5579,7	0,002244	0,002	21666	0,003834	0,00359	35912
0,000714	0,00047	5365,2	0,002254	0,00201	21814	0,003844	0,0036	35969

### **PŘÍLOHA 3 – Hodnoty SIMULACE DA8 (2/4)**

0,000724	0,00048	6464	0,002264	0,00202	21878	0,003854	0,00361	35995
0,000734	0,00049	6524,1	0,002274	0,00203	22037	0,003864	0,00362	36124
0,000744	0,0005	3485,6	0,002284	0,00204	22248	0,003874	0,00363	36245
0,000754	0,00051	5662,6	0,002294	0,00205	22397	0,003884	0,00364	36322
0,000764	0,00052	6673,8	0,002304	0,00206	22506	0,003894	0,00365	36369
0,000784	0,00054	7074,2	0,002314	0,00207	22610	0,003904	0,00366	36403
0,000794	0,00055	6913,3	0,002324	0,00208	22698	0,003914	0,00367	36467
0,000804	0,00056	6914,2	0,002334	0,00209	22715	0,003924	0,00368	36512
0,000814	0,00057	6858,7	0,002344	0,0021	22889	0,003934	0,00369	36551
0,000824	0,00058	6949,7	0,002364	0,00212	23026	0,003944	0,0037	36588
0,000834	0,00059	6749,9	0,002374	0,00213	23133	0,003954	0,00371	36635
0,000844	0,0006	7193,2	0,002384	0,00214	23279	0,003974	0,00373	36793
0,000864	0,00062	6863,6	0,002394	0,00215	23380	0,003984	0,00374	36899
0,000874	0,00063	7061,8	0,002404	0,00216	23514	0,003994	0,00375	36956
0,000884	0,00064	7465,1	0,002414	0,00217	23694	0,004004	0,00376	36999
0,000894	0,00065	6936,1	0,002424	0,00218	23838	0,004014	0,00377	37052
0,000904	0,00066	6896,8	0,002434	0,00219	23928	0,004024	0,00378	37150
0,000914	0,00067	6863,4	0,002444	0,0022	23967	0,004034	0,00379	37152
0,000924	0,00068	6987,5	0,002454	0,00221	24072	0,004044	0,0038	37166
0,000934	0,00069	6660,8	0,002464	0,00222	24126	0,004054	0,00381	37190
0,000954	0,00071	7269,5	0,002474	0,00223	24359	0,004064	0,00382	37272
0,000964	0,00072	7272,3	0,002494	0,00225	24512	0,004074	0,00383	37407
0,000974	0,00073	6941,8	0,002504	0,00226	24587	0,004084	0,00384	37511
0,000984	0,00074	6920,6	0,002514	0,00227	24755	0,004094	0,00385	37575
0,000994	0,00075	6754,2	0,002524	0,00228	24929	0,004104	0,00386	37592
0,001004	0,00076	6979,9	0,002534	0,00229	24975	0,004114	0,00387	37675
0,001014	0,00077	7535,7	0,002544	0,0023	24979	0,004124	0,00388	37743
0,001034	0,00079	7386,3	0,002554	0,00231	25106	0,004134	0,00389	37800
0,001044	0,0008	7327,1	0,002564	0,00232	25202	0,004144	0,0039	37817
0,001054	0,00081	7268,4	0,002574	0,00233	25285	0,004154	0,00391	37813
0,001064	0,00082	7311,4	0,002584	0,00234	25532	0,004164	0,00392	37854
0,001074	0,00083	7423,8	0,002594	0,00235	25657	0,004174	0,00393	37963
0,001084	0,00084	7501,2	0,002604	0,00236	25746	0,004184	0,00394	38098
0,001094	0,00085	7598,6	0,002614	0,00237	25777	0,004194	0,00395	38186
0,001114	0,00087	7754,8	0,002634	0,00239	26039	0,004204	0,00396	38224
0,001124	0,00088	7845,5	0,002644	0,0024	26094	0,004214	0,00397	38281
0,001134	0,00089	7920,5	0,002654	0,00241	26172	0,004224	0,00398	38325
0,001144	0,0009	7992,4	0,002664	0,00242	26284	0,004234	0,00399	38401
0,001154	0,00091	7855,8	0,002674	0,00243	26326	0,004244	0,004	38413
0,001164	0,00092	7410,2	0,002684	0,00244	26391	0,004254	0,00401	38426
0,001174	0,00093	5296,2	0,002694	0,00245	26498	0,004264	0,00402	38456
0,001184	0,00094	6873,9	0,002704	0,00246	26775	0,004274	0,00403	38539
0,001204	0,00096	5553,1	0,002714	0,00247	26868	0,004284	0,00404	38621



### **PŘÍLOHA 3 – Hodnoty SIMULACE DA8 (3/4)**

0,001214	0,00097	7621,6	0,002724	0,00248	26873	0,004294	0,00405	38758
0,001224	0,00098	8379,5	0,002734	0,00249	27124	0,004304	0,00406	38846
0,001234	0,00099	8634,1	0,002744	0,0025	27214	0,004314	0,00407	38884
0,001244	0,001	8983,8	0,002754	0,00251	27158	0,004324	0,00408	38912
0,001254	0,00101	8793,9	0,002764	0,00252	27277	0,004334	0,00409	38928
0,001264	0,00102	8534,2	0,002774	0,00253	27429	0,004344	0,0041	38975
0,001284	0,00104	7807,9	0,002794	0,00255	27440	0,004354	0,00411	39006
0,001294	0,00105	9930,6	0,002804	0,00256	27583	0,004364	0,00412	39059
0,001304	0,00106	10328,5	0,002814	0,00257	27809	0,004374	0,00413	39098
0,001314	0,00107	10434,8	0,002824	0,00258	27919	0,004384	0,00414	39164
0,001324	0,00108	10506,7	0,002834	0,00259	27961	0,004394	0,00415	39252
0,001334	0,00109	10204,2	0,002844	0,0026	28064	0,004404	0,00416	39388
0,001344	0,0011	10368	0,002854	0,00261	28161	0,004414	0,00417	39454
0,001364	0,00112	10866	0,002864	0,00262	28252	0,004424	0,00418	39498
0,001374	0,00113	11735	0,002874	0,00263	28294	0,004434	0,00419	39517
0,001384	0,00114	12026	0,002884	0,00264	28407	0,004444	0,0042	39490
0,001394	0,00115	12483	0,002894	0,00265	28499	0,004454	0,00421	39539
0,001404	0,00116	12272	0,002904	0,00266	28602	0,004464	0,00422	39625
0,001414	0,00117	11904	0,002914	0,00267	28694	0,004474	0,00423	39678
0,001424	0,00118	12027	0,002924	0,00268	28915	0,004484	0,00424	39733
0,001444	0,0012	12678	0,002934	0,00269	29035	0,004494	0,00425	39803
0,001454	0,00121	13443	0,002944	0,0027	29015	0,004504	0,00426	39866
0,001464	0,00122	13476	0,002964	0,00272	29101	0,004514	0,00427	39989
0,001474	0,00123	13689	0,002974	0,00273	29217	0,004524	0,00428	40053
0,001484	0,00124	13415	0,002984	0,00274	29286	0,004534	0,00429	40084
0,001494	0,00125	13465	0,002994	0,00275	29314	0,004554	0,00431	40084
0,001504	0,00126	13580	0,003004	0,00276	29443	0,004564	0,00432	40081
0,001514	0,00127	14313	0,003014	0,00277	29548	0,004574	0,00433	40085
0,001534	0,00129	14460	0,003024	0,00278	29681	0,004584	0,00434	40152
0,001544	0,0013	14814	0,003034	0,00279	29814	0,004594	0,00435	40280
0,001554	0,00131	14951	0,003044	0,0028	29954	0,004604	0,00436	40346
0,001564	0,00132	14921	0,003054	0,00281	30026	0,004614	0,00437	40421
0,001574	0,00133	15098	0,003064	0,00282	30063	0,004624	0,00438	40458
0,001584	0,00134	15097	0,003074	0,00283	30102	0,004634	0,00439	40512
0,001594	0,00135	15413	0,003084	0,00284	30174	0,004644	0,0044	40609
0,001604	0,00136	15832	0,003094	0,00285	30268	0,004654	0,00441	40641
0,001624	0,00138	15895	0,003104	0,00286	30356	0,004664	0,00442	40665
0,001634	0,00139	15743	0,003114	0,00287	30463	0,004674	0,00443	40657
0,001644	0,0014	15760	0,003124	0,00288	30579	0,004684	0,00444	40666
0,001654	0,00141	16053	0,003134	0,00289	30701	0,004694	0,00445	40704
0,001664	0,00142	16365	0,003154	0,00291	30792	0,004704	0,00446	40563
0,001674	0,00143	16537	0,003164	0,00292	30930	0,004714	0,00447	24788
0,001684	0,00144	16824	0,003174	0,00293	30980	0,004724	0,00448	16807

### **PŘÍLOHA 3 – Hodnoty SIMULACE DA8 (4/4)**

0,001694	0,00145	16845	0,003184	0,00294	31007	0,004734	0,00449	7507,9
0,001714	0,00147	16647	0,003194	0,00295	31051	0,004744	0,0045	13576
0,001724	0,00148	16706	0,003204	0,00296	31178	0,004754	0,00451	23772
0,001734	0,00149	17010	0,003214	0,00297	31267	0,004764	0,00452	20322
0,001744	0,0015	17143	0,003224	0,00298	31390	0,004774	0,00453	15127
0,001754	0,00151	17474	0,003234	0,00299	31459	0,004784	0,00454	7278,3
0,001764	0,00152	17673	0,003244	0,003	31587	0,004794	0,00455	3219,4
0,001774	0,00153	17713	0,003254	0,00301	31709	0,004804	0,00456	805,1
0,001784	0,00154	17703	0,003264	0,00302	31809	0,004814	0,00457	12,483
			0,003274	0,00303	31901			
			0,003284	0,00304	31942			
			0,003294	0,00305	31956			
			0,003304	0,00306	32022			
			0,003314	0,00307	32095			
			0,003324	0,00308	32256			
			0,003334	0,00309	32374			
			0,003344	0,0031	32448			
			0,003354	0,00311	32548			
			0,003374	0,00313	32668			
			0,003384	0,00314	32736			
			0,003394	0,00315	32798			
			0,003404	0,00316	32786			
			0,003414	0,00317	32866			

## PŘÍLOHA 4 – Hodnoty ARAMIS DB9

Čas pro srovnání [s]	Čas [s]	Síla [N]
0	0	6,103516
0,000238095	1	3,051758
0,00047619	2	7250,976562
0,000714286	3	11630,24902
0,000952381	4	12655,63965
0,001190476	5	15390,01465
0,001428571	6	19583,12988
0,001666667	7	23526,00098
0,001904762	8	28741,45508
0,002142857	9	31530,76172
0,002380952	10	34899,90234
0,002619048	11	38400,26856
0,002857143	12	41094,9707
0,003095238	13	44152,83203
0,003333333	14	47314,45313
0,003571429	15	50329,58984
0,003809524	16	53515,625
0,004047619	17	55859,375
0,004285714	18	58151,24512
0,00452381	19	60455,32227
0,004761905	20	65866,08887
0,0051	21	66928,10059
0,005352941	22	38272,09473
0,005605882	23	25677,49023
0,0059	24	27874,75586
0,00611	25	14895,62988
0,006362941	26	12304,6875
0,006615882	27	3839,111328
0,006868824	28	3417,96875
0,00695	29	6970,214844
0,007374706	30	1449,584961
0,007627647	31	-2706,90918
0,007880588	32	- 1623,535156
0,008133529	33	-897,216797
0,008386471	34	- 4885,864258
0,008639412	35	-146,484375
0,008892353	36	2957,15332
0,009145294	37	- 2279,663086
0,0094	38	15,258789

## **PŘÍLOHA 5 – Hodnoty KISTLER DB9 (1/2)**

Čas [s]	Síla [N]	0,0035	49471,8281
0,0000	-2,6158	0,0036	50360,5430
0,0001	-308,2275	0,0037	51363,6992
0,0002	800,6505	0,0038	52413,7227
0,0002	3734,2615	0,0038	53363,9063
0,0003	7003,5659	0,0039	54203,5781
0,0004	9878,3213	0,0040	55031,4766
0,0005	11760,3848	0,0041	55881,1719
0,0006	12354,6055	0,0042	56724,1094
0,0006	12482,7793	0,0042	57449,9922
0,0007	12353,2969	0,0043	57991,6797
0,0008	12322,7793	0,0044	58644,5391
0,0009	12897,5996	0,0045	59659,6836
0,0010	13476,3438	0,0046	60168,0195
0,0010	14057,0498	0,0046	60182,1875
0,0011	14956,8828	0,0047	62082,7773
0,0012	16059,6572	0,0048	62909,5859
0,0013	17666,6250	0,0049	57254,8984
0,0014	19588,3613	0,0050	54030,9336
0,0014	21287,0996	0,0050	60878,8594
0,0015	22700,0645	0,0051	63168,9883
0,0016	23963,7090	0,0052	53660,5820
0,0017	25442,5039	0,0053	45595,0039
0,0018	27170,4531	0,0054	40912,9531
0,0018	28787,2305	0,0054	32889,6641
0,0019	30029,7324	0,0055	26352,8008
0,0020	30745,8047	0,0056	23617,7715
0,0021	31372,0703	0,0057	19784,3281
0,0022	32432,9902	0,0058	18143,5723
0,0022	33631,6797	0,0058	21742,2481
0,0023	34558,1055	0,0059	22796,4121
0,0024	35329,1094	0,0060	18594,5781
0,0025	36311,1211	0,0061	15842,3281
0,0026	37592,8594	0,0062	15865,2168
0,0026	38817,2695	0,0062	15493,3379
0,0027	39771,5977	0,0063	15213,6660
0,0028	40627,8320	0,0064	14938,1357
0,0029	41630,9883	0,0065	12268,2842
0,0030	42792,8359	0,0066	8986,5547
0,0030	43822,8047	0,0066	8249,9912
0,0031	44650,7031	0,0067	8582,6328
0,0032	45492,1172	0,0068	8932,2773
0,0033	46439,0352	0,0069	9135,0010
0,0034	47501,6992	0,0070	7204,1099
0,0034	48559,3516	0,0070	4934,4741

## **PŘÍLOHA 5 – Hodnoty KISTLER DB9 (2/2)**

0,0071	4621,4512
0,0072	3844,5608
0,0073	2600,9695
0,0074	2608,1628
0,0074	1466,8055
0,0075	-1080,9762
0,0076	-1259,7220
0,0077	-254,3858
0,0078	-1232,2562
0,0078	-1275,4167
0,0079	103,5418
0,0080	-835,7457
0,0081	-1050,4586
0,0082	1889,0381
0,0082	2479,1172
0,0083	-167,4107
0,0084	-1298,0869
0,0085	-908,7698
0,0086	-1449,3669
0,0086	-2009,5825
0,0087	-386,2653
0,0088	1742,3357
0,0089	585,0656
0,0090	-2064,5142
0,0090	-1808,8204
0,0091	192,4787
0,0092	694,4929
0,0093	5,4496
0,0094	15,4768

## PŘÍLOHA 6 – Hodnoty SIMULACE DB9 (1/8)

Čas [s]	Čas pro srovnání [s]	Síla [N]			
0,00001	0,00006	12,48300	0,00043	0,00048	7308,70000
0,00002	0,00007	626,11000	0,00044	0,00049	8000,00000
0,00003	0,00008	1295,80000	0,00045	0,00050	9089,30000
0,00004	0,00009	3000,00000	0,00046	0,00051	11307,00000
0,00005	0,00010	4271,70000	0,00047	0,00052	11721,00000
0,00006	0,00011	3667,30000	0,00048	0,00053	10969,00000
0,00007	0,00012	4035,30000	0,00049	0,00054	12931,00000
0,00008	0,00013	3887,40000	0,00050	0,00055	10720,00000
0,00009	0,00014	4126,20000	0,00050	0,00055	13000,00000
0,00010	0,00015	4026,10000	0,00051	0,00056	12500,00000
0,00011	0,00016	7380,60000	0,00052	0,00057	11049,00000
0,00012	0,00017	6532,50000	0,00053	0,00058	13940,00000
0,00013	0,00018	5000,00000	0,00054	0,00059	12762,00000
0,00014	0,00019	7000,00000	0,00055	0,00060	14078,00000
0,00015	0,00020	899,48000	0,00056	0,00061	15000,00000
0,00016	0,00021	963,86000	0,00057	0,00062	14500,00000
0,00017	0,00022	4741,20000	0,00058	0,00063	10599,00000
0,00018	0,00023	5285,80000	0,00059	0,00064	12000,00000
0,00019	0,00024	6287,40000	0,00060	0,00065	16089,00000
0,00020	0,00025	6700,00000	0,00061	0,00066	16376,00000
0,00021	0,00026	6893,10000	0,00062	0,00067	15640,00000
0,00022	0,00027	6863,10000	0,00063	0,00068	17420,00000
0,00023	0,00028	6854,00000	0,00064	0,00069	18000,00000
0,00024	0,00029	3588,70000	0,00064	0,00069	16500,00000
0,00025	0,00030	5591,40000	0,00065	0,00070	17900,00000
0,00026	0,00031	5000,00000	0,00066	0,00071	12000,00000
0,00027	0,00032	3822,40000	0,00067	0,00072	15000,00000
0,00028	0,00033	2831,10000	0,00068	0,00073	15210,00000
0,00029	0,00034	4192,80000	0,00069	0,00074	14564,00000
0,00030	0,00035	6000,00000	0,00070	0,00075	12803,00000
0,00031	0,00036	7000,00000	0,00071	0,00076	14364,00000
0,00032	0,00037	7974,70000	0,00072	0,00077	14007,00000
0,00033	0,00038	6718,70000	0,00073	0,00078	15252,00000
0,00034	0,00039	9633,30000	0,00074	0,00079	13408,00000
0,00035	0,00040	5578,90000	0,00075	0,00080	10000,00000
0,00036	0,00041	9943,50000	0,00076	0,00081	12000,00000
0,00037	0,00042	10005,00000	0,00076	0,00081	10823,00000
0,00038	0,00043	12176,00000	0,00077	0,00082	10917,00000
0,00039	0,00044	9698,60000	0,00078	0,00083	14009,00000
0,00040	0,00045	4685,10000	0,00079	0,00084	13800,00000
0,00041	0,00046	8255,70000	0,00080	0,00085	13404,00000
0,00042	0,00047	6732,90000	0,00081	0,00086	14144,00000

## PŘÍLOHA 6 – Hodnoty SIMULACE DB9 (2/8)

0,00083	0,00088	14227,00000	0,00119	0,00124	20000,00000
0,00084	0,00089	17000,00000	0,00120	0,00125	19657,00000
0,00085	0,00090	19432,00000	0,00121	0,00126	16000,00000
0,00085	0,00090	17000,00000	0,00121	0,00126	14000,00000
0,00086	0,00091	18000,00000	0,00122	0,00127	13801,00000
0,00087	0,00092	14010,00000	0,00123	0,00128	14876,00000
0,00088	0,00093	14500,00000	0,00124	0,00129	15692,00000
0,00089	0,00094	14836,00000	0,00125	0,00130	17000,00000
0,00090	0,00095	14018,00000	0,00126	0,00131	20000,00000
0,00091	0,00096	15220,00000	0,00126	0,00131	18000,00000
0,00092	0,00097	15000,00000	0,00127	0,00132	21000,00000
0,00093	0,00098	14562,00000	0,00128	0,00133	12000,00000
0,00094	0,00099	13801,00000	0,00129	0,00134	15397,00000
0,00094	0,00099	14744,00000	0,00130	0,00135	14000,00000
0,00095	0,00100	12000,00000	0,00131	0,00136	15000,00000
0,00096	0,00101	10465,00000	0,00131	0,00136	18840,00000
0,00097	0,00102	15719,00000	0,00132	0,00137	17349,00000
0,00098	0,00103	15486,00000	0,00133	0,00138	20291,00000
0,00099	0,00104	16088,00000	0,00134	0,00139	18678,00000
0,00100	0,00105	17000,00000	0,00135	0,00140	21769,00000
0,00101	0,00106	20000,00000	0,00136	0,00141	17938,00000
0,00101	0,00106	18000,00000	0,00137	0,00142	15000,00000
0,00102	0,00107	19000,00000	0,00137	0,00142	16448,00000
0,00103	0,00108	18500,00000	0,00138	0,00143	14584,00000
0,00104	0,00109	18000,00000	0,00139	0,00144	21181,00000
0,00105	0,00110	14900,00000	0,00140	0,00145	21590,00000
0,00106	0,00111	14974,00000	0,00141	0,00146	22241,00000
0,00107	0,00112	15569,00000	0,00142	0,00147	21632,00000
0,00108	0,00113	14000,00000	0,00143	0,00148	20976,00000
0,00108	0,00113	12564,00000	0,00143	0,00148	19088,00000
0,00109	0,00114	13591,00000	0,00144	0,00149	21279,00000
0,00110	0,00115	14517,00000	0,00145	0,00150	20469,00000
0,00111	0,00116	14000,00000	0,00146	0,00151	22275,00000
0,00112	0,00117	13771,00000	0,00147	0,00152	23425,00000
0,00113	0,00118	15496,00000	0,00148	0,00153	23088,00000
0,00114	0,00119	15500,00000	0,00148	0,00153	24401,00000
0,00115	0,00120	16611,00000	0,00149	0,00154	23464,00000
0,00115	0,00120	18000,00000	0,00150	0,00155	23793,00000
0,00116	0,00121	17500,00000	0,00151	0,00156	23342,00000
0,00117	0,00122	18000,00000	0,00152	0,00157	24695,00000
0,00118	0,00123	16000,00000	0,00153	0,00158	21093,00000
0,00119	0,00124	20000,00000	0,00154	0,00159	23751,00000
			0,00154	0,00159	25743,00000
			0,00155	0,00160	25160,00000

## **PŘÍLOHA 6 – Hodnoty SIMULACE DB9 (3/8)**

0,00156	0,00161	25567,00000	0,00193	0,00198	31800,00000
0,00157	0,00162	26880,00000	0,00194	0,00199	32024,00000
0,00158	0,00163	25368,00000	0,00195	0,00200	31848,00000
0,00159	0,00164	25214,00000	0,00196	0,00201	32331,00000
0,00160	0,00165	25072,00000	0,00197	0,00202	32513,00000
0,00160	0,00165	26033,00000	0,00198	0,00203	32920,00000
0,00161	0,00166	27023,00000	0,00198	0,00203	32788,00000
0,00162	0,00167	25834,00000	0,00199	0,00204	32863,00000
0,00163	0,00168	27693,00000	0,00200	0,00205	33247,00000
0,00164	0,00169	26427,00000	0,00201	0,00206	33084,00000
0,00165	0,00170	26926,00000	0,00202	0,00207	33656,00000
0,00165	0,00170	27494,00000	0,00203	0,00208	33212,00000
0,00166	0,00171	27187,00000	0,00203	0,00208	33590,00000
0,00167	0,00172	27454,00000	0,00204	0,00209	33095,00000
0,00168	0,00173	27704,00000	0,00205	0,00210	33625,00000
0,00169	0,00174	28541,00000	0,00206	0,00211	33427,00000
0,00170	0,00175	27514,00000	0,00207	0,00212	34109,00000
0,00171	0,00176	28094,00000	0,00208	0,00213	34063,00000
0,00171	0,00176	27876,00000	0,00208	0,00213	34769,00000
0,00172	0,00177	28482,00000	0,00209	0,00214	34516,00000
0,00173	0,00178	28015,00000	0,00210	0,00215	34618,00000
0,00174	0,00179	28871,00000	0,00211	0,00216	34306,00000
0,00175	0,00180	28248,00000	0,00212	0,00217	34526,00000
0,00176	0,00181	29029,00000	0,00213	0,00218	34574,00000
0,00176	0,00181	28778,00000	0,00213	0,00218	34953,00000
0,00177	0,00182	29506,00000	0,00214	0,00219	34882,00000
0,00178	0,00183	29479,00000	0,00215	0,00220	34956,00000
0,00179	0,00184	30209,00000	0,00216	0,00221	34935,00000
0,00180	0,00185	30054,00000	0,00217	0,00222	35210,00000
0,00181	0,00186	30088,00000	0,00218	0,00223	35229,00000
0,00182	0,00187	29505,00000	0,00218	0,00223	35650,00000
0,00182	0,00187	29449,00000	0,00219	0,00224	35823,00000
0,00183	0,00188	29704,00000	0,00220	0,00225	36094,00000
0,00184	0,00189	30340,00000	0,00221	0,00226	36069,00000
0,00185	0,00190	30491,00000	0,00222	0,00227	36013,00000
0,00186	0,00191	31081,00000	0,00223	0,00228	35873,00000
0,00187	0,00192	31208,00000	0,00223	0,00228	36035,00000
0,00187	0,00192	31340,00000	0,00224	0,00229	36245,00000
0,00188	0,00193	30853,00000	0,00225	0,00230	36378,00000
0,00189	0,00194	31226,00000	0,00226	0,00231	36489,00000
0,00190	0,00195	31538,00000	0,00227	0,00232	36516,00000
0,00191	0,00196	31837,00000	0,00228	0,00233	36624,00000
0,00192	0,00197	31537,00000	0,00228	0,00233	36783,00000
0,00192	0,00197	32318,00000	0,00229	0,00234	37117,00000



## **PŘÍLOHA 6 – Hodnoty SIMULACE DB9 (4/8)**

0,00230	0,00235	37290,00000	0,00267	0,00272	41611,00000
0,00231	0,00236	37515,00000	0,00267	0,00272	41681,00000
0,00232	0,00237	37545,00000	0,00268	0,00273	41596,00000
0,00233	0,00238	37593,00000	0,00269	0,00274	42010,00000
0,00233	0,00238	37314,00000	0,00270	0,00275	42144,00000
0,00234	0,00239	37402,00000	0,00271	0,00276	42552,00000
0,00235	0,00240	37471,00000	0,00272	0,00277	42652,00000
0,00236	0,00241	37795,00000	0,00272	0,00277	42768,00000
0,00237	0,00242	38036,00000	0,00273	0,00278	42738,00000
0,00238	0,00243	38157,00000	0,00274	0,00279	42740,00000
0,00238	0,00243	38171,00000	0,00275	0,00280	42888,00000
0,00239	0,00244	38234,00000	0,00276	0,00281	42969,00000
0,00240	0,00245	38495,00000	0,00276	0,00281	43120,00000
0,00241	0,00246	38707,00000	0,00277	0,00282	43067,00000
0,00242	0,00247	38965,00000	0,00278	0,00283	43021,00000
0,00243	0,00248	39018,00000	0,00279	0,00284	42934,00000
0,00243	0,00248	39010,00000	0,00280	0,00285	43118,00000
0,00244	0,00249	38968,00000	0,00281	0,00286	43373,00000
0,00245	0,00250	38756,00000	0,00281	0,00286	43763,00000
0,00246	0,00251	38923,00000	0,00282	0,00287	44023,00000
0,00247	0,00252	39005,00000	0,00283	0,00288	44051,00000
0,00248	0,00253	39472,00000	0,00284	0,00289	44080,00000
0,00248	0,00253	39558,00000	0,00285	0,00290	44045,00000
0,00249	0,00254	39840,00000	0,00286	0,00291	44027,00000
0,00250	0,00255	39660,00000	0,00286	0,00291	44094,00000
0,00251	0,00256	39967,00000	0,00287	0,00292	44202,00000
0,00252	0,00257	39969,00000	0,00288	0,00293	44364,00000
0,00253	0,00258	40244,00000	0,00289	0,00294	44428,00000
0,00253	0,00258	40271,00000	0,00290	0,00295	44403,00000
0,00254	0,00259	40549,00000	0,00290	0,00295	44478,00000
0,00255	0,00260	40315,00000	0,00291	0,00296	44570,00000
0,00256	0,00261	40351,00000	0,00292	0,00297	44884,00000
0,00257	0,00262	40135,00000	0,00293	0,00298	45098,00000
0,00258	0,00263	40403,00000	0,00294	0,00299	45355,00000
0,00258	0,00263	40557,00000	0,00295	0,00300	45323,00000
0,00259	0,00264	41108,00000	0,00295	0,00300	45404,00000
0,00260	0,00265	40992,00000	0,00296	0,00301	45225,00000
0,00261	0,00266	41401,00000	0,00297	0,00302	45342,00000
0,00262	0,00267	41147,00000	0,00298	0,00303	45278,00000
0,00262	0,00267	41501,00000	0,00299	0,00304	45594,00000
0,00263	0,00268	41358,00000	0,00299	0,00304	45596,00000
0,00264	0,00269	41777,00000	0,00300	0,00305	45775,00000
0,00265	0,00270	41626,00000	0,00301	0,00306	45676,00000
0,00266	0,00271	41930,00000	0,00302	0,00307	45781,00000

## **PŘÍLOHA 6 – Hodnoty SIMULACE DB9 (5/8)**

0,00303	0,00308	45865,00000	0,00338	0,00343	49797,00000
0,00304	0,00309	46213,00000	0,00339	0,00344	49897,00000
0,00304	0,00309	46478,00000	0,00340	0,00345	49875,00000
0,00305	0,00310	46667,00000	0,00341	0,00346	49757,00000
0,00306	0,00311	46648,00000	0,00342	0,00347	49679,00000
0,00307	0,00312	46481,00000	0,00342	0,00347	49664,00000
0,00308	0,00313	46409,00000	0,00343	0,00348	49888,00000
0,00308	0,00313	46426,00000	0,00344	0,00349	50143,00000
0,00309	0,00314	46477,00000	0,00345	0,00350	50360,00000
0,00310	0,00315	46662,00000	0,00346	0,00351	50496,00000
0,00311	0,00316	46785,00000	0,00346	0,00351	50575,00000
0,00312	0,00317	46994,00000	0,00347	0,00352	50617,00000
0,00312	0,00317	47048,00000	0,00348	0,00353	50672,00000
0,00313	0,00318	47177,00000	0,00349	0,00354	50680,00000
0,00314	0,00319	47265,00000	0,00350	0,00355	50780,00000
0,00315	0,00320	47559,00000	0,00351	0,00356	50812,00000
0,00316	0,00321	47622,00000	0,00351	0,00356	50720,00000
0,00317	0,00322	47795,00000	0,00352	0,00357	50676,00000
0,00317	0,00322	47699,00000	0,00353	0,00358	50698,00000
0,00318	0,00323	47625,00000	0,00354	0,00359	50698,00000
0,00319	0,00324	47476,00000	0,00355	0,00360	50963,00000
0,00320	0,00325	47551,00000	0,00355	0,00360	51207,00000
0,00321	0,00326	47651,00000	0,00356	0,00361	51494,00000
0,00321	0,00326	47916,00000	0,00357	0,00362	51619,00000
0,00322	0,00327	48088,00000	0,00358	0,00363	51659,00000
0,00323	0,00328	48295,00000	0,00359	0,00364	51640,00000
0,00324	0,00329	48349,00000	0,00359	0,00364	51612,00000
0,00325	0,00330	48347,00000	0,00360	0,00365	51616,00000
0,00325	0,00330	48462,00000	0,00361	0,00366	51544,00000
0,00326	0,00331	48596,00000	0,00362	0,00367	51662,00000
0,00327	0,00332	48757,00000	0,00363	0,00368	51692,00000
0,00328	0,00333	48839,00000	0,00363	0,00368	51683,00000
0,00329	0,00334	48821,00000	0,00364	0,00369	51704,00000
0,00330	0,00335	48698,00000	0,00365	0,00370	51795,00000
0,00330	0,00335	48655,00000	0,00366	0,00371	52020,00000
0,00331	0,00336	48665,00000	0,00367	0,00372	52307,00000
0,00332	0,00337	48870,00000	0,00367	0,00372	52543,00000
0,00333	0,00338	49079,00000	0,00368	0,00373	52635,00000
0,00334	0,00339	49245,00000	0,00369	0,00374	52609,00000
0,00334	0,00339	49382,00000	0,00370	0,00375	52506,00000
0,00335	0,00340	49463,00000	0,00371	0,00376	52456,00000
0,00336	0,00341	49508,00000	0,00371	0,00376	52366,00000
0,00337	0,00342	49571,00000	0,00372	0,00377	52462,00000
0,00338	0,00343	49680,00000	0,00373	0,00378	52513,00000

## **PŘÍLOHA 6 – Hodnoty SIMULACE DB9 (6/8)**

0,00374	0,00379	52597,00000	0,00409	0,00414	55415,00000
0,00375	0,00380	52687,00000	0,00410	0,00415	55471,00000
0,00375	0,00380	52767,00000	0,00411	0,00416	55509,00000
0,00376	0,00381	52865,00000	0,00411	0,00416	55566,00000
0,00377	0,00382	53031,00000	0,00412	0,00417	55613,00000
0,00378	0,00383	53240,00000	0,00413	0,00418	55630,00000
0,00379	0,00384	53424,00000	0,00414	0,00419	55595,00000
0,00379	0,00384	53519,00000	0,00415	0,00420	55522,00000
0,00380	0,00385	53478,00000	0,00415	0,00420	55442,00000
0,00381	0,00386	53354,00000	0,00416	0,00421	55357,00000
0,00382	0,00387	53179,00000	0,00417	0,00422	55442,00000
0,00383	0,00388	53172,00000	0,00418	0,00423	55654,00000
0,00383	0,00388	53228,00000	0,00419	0,00424	55868,00000
0,00384	0,00389	53342,00000	0,00419	0,00424	56074,00000
0,00385	0,00390	53495,00000	0,00420	0,00425	56155,00000
0,00386	0,00391	53617,00000	0,00421	0,00426	56177,00000
0,00387	0,00392	53717,00000	0,00422	0,00427	56166,00000
0,00387	0,00392	53814,00000	0,00423	0,00428	56183,00000
0,00388	0,00393	53942,00000	0,00423	0,00428	56195,00000
0,00389	0,00394	54095,00000	0,00424	0,00429	56210,00000
0,00390	0,00395	54240,00000	0,00425	0,00430	56206,00000
0,00391	0,00396	54297,00000	0,00426	0,00431	56174,00000
0,00391	0,00396	54241,00000	0,00426	0,00431	56145,00000
0,00392	0,00397	54024,00000	0,00427	0,00432	56145,00000
0,00393	0,00398	53933,00000	0,00428	0,00433	56205,00000
0,00394	0,00399	53912,00000	0,00429	0,00434	56319,00000
0,00395	0,00400	53991,00000	0,00430	0,00435	56518,00000
0,00395	0,00400	54188,00000	0,00430	0,00435	56689,00000
0,00396	0,00401	54362,00000	0,00431	0,00436	56812,00000
0,00397	0,00402	54511,00000	0,00432	0,00437	56824,00000
0,00398	0,00403	54591,00000	0,00433	0,00438	56768,00000
0,00399	0,00404	54688,00000	0,00434	0,00439	56715,00000
0,00399	0,00404	54785,00000	0,00434	0,00439	56719,00000
0,00400	0,00405	54872,00000	0,00435	0,00440	56733,00000
0,00401	0,00406	54957,00000	0,00436	0,00441	56774,00000
0,00402	0,00407	54982,00000	0,00437	0,00442	56805,00000
0,00403	0,00408	54941,00000	0,00438	0,00443	56800,00000
0,00403	0,00408	54849,00000	0,00438	0,00443	56846,00000
0,00404	0,00409	54654,00000	0,00439	0,00444	56926,00000
0,00405	0,00410	54642,00000	0,00440	0,00445	57037,00000
0,00406	0,00411	54733,00000	0,00441	0,00446	57187,00000
0,00407	0,00412	54945,00000	0,00442	0,00447	57322,00000
0,00407	0,00412	55166,00000	0,00442	0,00447	57329,00000
0,00408	0,00413	55337,00000	0,00443	0,00448	57343,00000

## **PŘÍLOHA 6 – Hodnoty SIMULACE DB9 (7/8)**

0,00444	0,00449	57282,00000	0,00479	0,00484	58650,00000
0,00445	0,00450	57221,00000	0,00479	0,00484	58651,00000
0,00445	0,00450	57178,00000	0,00480	0,00485	58754,00000
0,00446	0,00451	57190,00000	0,00481	0,00486	58895,00000
0,00447	0,00452	57245,00000	0,00482	0,00487	59056,00000
0,00448	0,00453	57326,00000	0,00483	0,00488	59169,00000
0,00449	0,00454	57403,00000	0,00483	0,00488	59215,00000
0,00449	0,00454	57479,00000	0,00484	0,00489	59211,00000
0,00450	0,00455	57567,00000	0,00485	0,00490	59195,00000
0,00451	0,00456	57684,00000	0,00486	0,00491	59168,00000
0,00452	0,00457	57804,00000	0,00487	0,00492	59138,00000
0,00453	0,00458	57892,00000	0,00487	0,00492	59025,00000
0,00453	0,00458	57941,00000	0,00488	0,00493	59010,00000
0,00454	0,00459	57937,00000	0,00489	0,00494	58978,00000
0,00455	0,00460	57864,00000	0,00490	0,00495	58957,00000
0,00456	0,00461	57667,00000	0,00490	0,00495	59004,00000
0,00457	0,00462	57644,00000	0,00491	0,00496	59108,00000
0,00457	0,00462	57662,00000	0,00492	0,00497	59244,00000
0,00458	0,00463	57768,00000	0,00493	0,00498	59422,00000
0,00459	0,00464	57912,00000	0,00494	0,00499	59566,00000
0,00460	0,00465	58001,00000	0,00494	0,00499	59641,00000
0,00461	0,00466	58104,00000	0,00495	0,00500	59636,00000
0,00461	0,00466	58184,00000	0,00496	0,00501	59587,00000
0,00462	0,00467	58269,00000	0,00497	0,00502	59537,00000
0,00463	0,00468	58387,00000	0,00498	0,00503	59489,00000
0,00464	0,00469	58461,00000	0,00498	0,00503	59454,00000
0,00464	0,00469	58491,00000	0,00499	0,00504	59439,00000
0,00465	0,00470	58466,00000	0,00500	0,00505	59417,00000
0,00466	0,00471	58383,00000	0,00501	0,00506	59414,00000
0,00467	0,00472	58263,00000	0,00501	0,00506	59445,00000
0,00468	0,00473	58190,00000	0,00502	0,00507	59535,00000
0,00468	0,00473	58180,00000	0,00503	0,00508	59649,00000
0,00469	0,00474	58259,00000	0,00504	0,00509	59775,00000
0,00470	0,00475	58380,00000	0,00505	0,00510	59861,00000
0,00471	0,00476	58514,00000	0,00505	0,00510	59849,00000
0,00472	0,00477	58577,00000	0,00506	0,00511	59845,00000
0,00472	0,00477	58649,00000	0,00507	0,00512	59779,00000
0,00473	0,00478	58701,00000	0,00508	0,00513	59477,00000
0,00474	0,00479	58771,00000	0,00509	0,00514	43025,00000
0,00475	0,00480	58822,00000	0,00509	0,00514	34439,00000
0,00475	0,00480	58837,00000	0,00510	0,00515	29501,00000
0,00476	0,00481	58803,00000	0,00511	0,00516	28088,00000
0,00477	0,00482	58760,00000	0,00512	0,00517	40106,00000
0,00478	0,00483	58682,00000	0,00512	0,00517	42971,00000

## **PŘÍLOHA 6 – Hodnoty SIMULACE DB9 (8/8)**

0,00513	0,00518	45898,00000
0,00514	0,00519	29465,00000
0,00515	0,00520	27298,00000
0,00516	0,00521	24632,00000
0,00516	0,00521	19533,00000
0,00517	0,00522	18150,00000
0,00518	0,00523	19114,00000
0,00519	0,00524	26832,00000
0,00520	0,00525	31189,00000
0,00520	0,00525	20963,00000
0,00521	0,00526	16057,00000
0,00522	0,00527	7596,60000
0,00523	0,00528	5576,70000
0,00523	0,00528	8100,30000
0,00524	0,00529	14643,00000
0,00525	0,00530	26191,00000
0,00526	0,00531	16863,00000
0,00527	0,00532	11353,00000
0,00527	0,00532	6530,20000
0,00528	0,00533	6683,50000
0,00529	0,00534	4753,30000
0,00530	0,00535	1406,90000
0,00531	0,00536	12,48300
0,00531	0,00536	7102,90000
0,00532	0,00537	3353,60000
0,00533	0,00538	1822,40000
0,00534	0,00539	3112,00000
0,00534	0,00539	643,10000
0,00535	0,00540	5456,60000
0,00536	0,00541	890,73000
0,00537	0,00542	534,63000
0,00538	0,00543	12,48300
0,00538	0,00543	917,85000
0,00539	0,00544	221,57000
0,00540	0,00545	527,17000
0,00541	0,00546	12,48300
0,00542	0,00547	12,48300
0,00542	0,00547	12,48300